

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ФИЗИКИ АТМОСФЕРЫ

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ GPS
ПРИ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ
ВОЗМУЩЕНИЯХ ИОНОСФЕРЫ

Выполнил студент
231м группы
Сыроватский Семён Владиславович

подпись студента

Научный руководитель:
к.ф.-м.н., с.н.с.
Падохин Артём Михайлович

подпись научного руководителя

Допущена к защите « 29 » мая 2020 г.
Зав. кафедры физики атмосферы
д.ф.-м.н., проф.
Мохов Игорь Иванович

подпись зав. кафедрой

Москва
2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1 Общие принципы работы GPS	5
1.1 Архитектура GPS	6
1.2 Сигналы GPS	7
1.3 Измерения GPS	9
1.4 Источники ошибок GPS	12
1.5 Принцип позиционирования GPS	18
ГЛАВА 2 Методы учёта влияния ионосферы в задачах прицезионного GPS позиционирования	23
2.1 Ионосфера и её влияние на сигналы GPS	23
2.2 Комбинирование многочастотных измерений	29
2.3 Разностные методы	31
2.4 Моделирование ионосферы	34
ГЛАВА 3 Исследование точности позиционирования GPS в условиях естественной ионосферной возмущённости	41
3.1 Исходные данные и метод оценки ошибки PPP	42
3.2 Экспериментальные результаты	43
ГЛАВА 4 Исследование точности позиционирования GPS в условиях искусственной ионосферной возмущённости	48
4.1 Постановка эксперимента на стенде СУРА	49
4.2 Экспериментальные результаты	51
ВЫВОДЫ	56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	57
ЛИТЕРАТУРА	58
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Вклады ионосферных эффектов в распространение радиоволн	
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Программа работы стенда СУРА	
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Список приёмников GPS для эксперимента на стенде СУРА	

ВВЕДЕНИЕ

За последние пару десятков лет Глобальные Навигационные Спутниковые Системы (ГНСС) нашли своё применение в различных сферах жизни человека. Недавние маркетинговые исследования Европейского агентства по ГНСС [1] показывают, что в период с 2015 по 2025 год мировой доход от услуг, использующих технологию ГНСС, увеличится примерно в 4 раза, а количество приёмных блоков ГНСС увеличится более чем в 2 раза и составит порядка 9 миллиардов единиц. Таким образом, технология ГНСС является актуальной и развивающейся.

В настоящее время существуют две полностью функционирующих ГНСС: GPS (США) с июля 1995 года и ГЛОНАСС (Россия) с октября 2011 года, а также две находятся на стадии разработки: Galileo (ЕС) и BeiDou (Китай). Помимо этого, существуют региональные навигационные спутниковые системы, использование которых возможно только в определённых районах. К ним относятся QZSS (Япония) и IRNSS (Индия).

По сравнению с другими системами позиционирования (наземными радионавигационными и инерциальными навигационными) ГНСС является наиболее точной. Однако некоторые приложения ГНСС требуют повышенной точности и надёжности при определении координат. К ним относятся точное земледелие, геодезия, беспилотные автомобили, авиация и т.д. Поэтому вопрос точности позиционирования ГНСС играет принципиальную роль.

Состояние ионосферы является одним из ключевых факторов, которые определяют точность позиционирования ГНСС. При распространении через ионосферу сигналы ГНСС подвергаются рассеянию на неоднородностях электронной концентрации. Наибольший эффект оказывают неоднородности размера порядка радиуса первой зоны Френеля $\sqrt{\lambda Z}$ (λ – длина волны сигнала, Z – расстояние до неоднородности). Для рабочих частот ГНСС размер таких неоднородностей варьируется от 100 до 300 м (так называемые мелкомасштабные неоднородности).

Условно говоря, неоднородности могут быть результатом естественных и искусственных возмущений ионосферы. Естественные возмущения ионосферы могут быть обусловлены внезапным повышением солнечной активности (например, солнечные вспышки), которое сопровождается магнитной бурей. С другой стороны существуют экспериментальные установки по изменению состояния ионосферы путем её нагрева с помощью мощных высокочастотных волн. Одной из таких экспериментальных установок является радиокомплекс СУРА, который

расположен вблизи Нижнего Новгорода ($56,15^{\circ}\text{N}$, $46,1^{\circ}\text{E}$).

В настоящее время существуют и используются два основных метода позиционирования. Первый – метод абсолютного позиционирования (absolute positioning), также известный как Single Point Positioning (SPP). Этот метод позволяет одному приёмнику напрямую определять “абсолютные” координаты точки относительно системы координат WGS84. Второй – метод относительного позиционирования (relative positioning), который иногда называется методом дифференциального позиционирования (differential positioning). Этот метод требует использования уже, как минимум, двух приёмников: координаты пользовательского приёмника определяются относительно известных координат опорных (сетевых) приёмников. Поскольку в методе дифференциального позиционирования используются измерения, выполняемые одновременно на нескольких приёмниках, то многие ошибки (ионосферная и тропосферная задержки, ошибки часов и координат спутника) могут быть устранены путем формирования разницы между измерениями. Поэтому метод дифференциального позиционирования широко используется для приложений, которые требуют высокой точности. Однако эффективность этого метода в значительной степени зависит от расстояния между приёмниками: при увеличении расстояния качество позиционирования ухудшается. Это является его основным ограничением. Кроме того, требование одновременной работы по меньшей мере двух приёмников технически реализуется более трудно и дорого, что делает метод дифференциального позиционирования менее привлекательным для большинства приложений. В попытке преодолеть сетевую зависимость и удовлетворить высокую точность был разработан Precise Point Positioning (PPP) метод. Первоначально PPP был ввёден для статических приложений [2], но в дальнейшем был изменён и для кинематических приложений. PPP расширяет возможности SPP, используя точные эфемериды спутников, полученные, например, от IGS [3], вместо обычного широковещательного навигационного сообщения.

В соответствии с вышеизложенным, данная работа состоит из двух частей. Первая часть посвящена анализу ошибки позиционирования во время нескольких сильных геомагнитных бурь за последнее десятилетие в глобальном масштабе. Основная цель заключается в том, чтобы проанализировать изменения точности позиционирования в различных широтно-долготных областях. Вторая часть работы посвящена анализу ошибки позиционирования во время работы нагревательного стенда СУРА. Здесь анализируется возможность влияния мощного высокочастотного радиоизлучения на качество позиционирования GPS как вблизи области возмущения, так и на значительном расстоянии от неё.

ГЛАВА 1

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ GPS

Глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС) – это сложная глобальная сеть, состоящая из трёх сегментов: космического сегмента (созвездия спутников), сегмента управления (наземных станций слежения) и пользовательского сегмента (приёмного оборудования).

Система работает с использованием созвездия спутников. Эти спутники врачаются в такой конфигурации, что в любой момент времени в любой точке Земли их видимое число составляет от четырех до десяти. Каждый спутник непрерывно передаёт закодированный сигнал, содержащий информацию, которая однозначно определяет его самого и месторасположение в пространстве. Приёмник на поверхности Земли может выбрать один из этих сигналов и использовать его для определения расстояния до соответствующего спутника. Поскольку электромагнитный сигнал через атмосферу Земли распространяется примерно со скоростью света в вакууме c , то это расстояние можно рассчитать путём простого умножения времени между излучением и приёмом и c .

Используя несколько сигналов одновременно, приёмник может определить своё месторасположение на поверхности Земли методом трилатерации. В теории, необходимо только три спутника, чтобы определить позицию приёмника, т.к. имеются только три неизвестных координаты: x , y и z . Однако часы в приёмнике, которые используются для определения времени приёма сигнала, не синхронизованы с часами спутника. Поскольку расчёт расстояния зависит от времени распространения сигнала, то любая ошибка во времени приёма переводится в ошибку расстояния. Эта ошибка часов приёмника является четвёртой неизвестной в системе уравнений, поэтому, на самом деле, необходимо четыре спутника для нахождения решения.

В настоящее время существуют две полностью функционирующих ГНСС: GPS (США) с июля 1995 года и ГЛОНАСС (Россия) с октября 2011 года, а также две находятся на стадии разработки: Galileo (ЕС) и BeiDou (Китай). Помимо этого, существуют региональные навигационные спутниковые системы, использование которых возможно только в определённых районах. К ним относятся QZSS (Япония) и IRNSS (Индия).

Между каждой навигационной спутниковой системой имеются различия, но фундаментальные принципы остаются одинаковыми и применимыми к любой из упомянутых систем. Основной фокус данной работы направлен на GPS.

1.1 АРХИТЕКТУРА GPS

Архитектура GPS состоит из трёх основных сегментов: космического сегмента, сегмента управления и пользовательского сегмента.

Космический сегмент

Космический сегмент GPS состоит из созвездия спутников, которые вращаются вокруг Земли в определённой конфигурации. Эти спутники расположены так, что в любой момент времени в любой точке Земли их видимое число составляет от четырех до десяти, что гарантирует приёмнику стабильное определение своего месторасположения. Все спутники вращаются по почти круговым (эксцентриситет 0,02) средним околоземным орбитам (Medium Earth Orbit, MEO) на высоте примерно 20200 км. Орбитальный период равен половине сидерического дня, что соответствует примерно 11 часам и 58 минутам. Постепенно старые спутники выводятся и заменяются новыми спутниками, которые имеют более продолжительное время жизни и улучшенные технические характеристики. В настоящее время созвездие GPS включает в себя 32 действующих спутника, 31 из которых используется по целевому назначению и 1 выведен на техобслуживание.

Сегмент управления

Сегмент управления GPS представляет собой глобально распределённую сеть наземных станций, которые отслеживают и контролируют спутниковое созвездие. Сегмент управления состоит из трёх элементов: станций мониторинга, наземных антенных станций и главной станции управления (Master Control Station, MCS).

В настоящее время сегмент управления включает в себя 16 станций мониторинга, расположенных в нескольких точках по всему миру [4]. Эти станции оснащены двухчастотным приёмником, дроссельной кольцевой антенной, которая устраняет эффект многолучности, двумя цезиевыми часами и метеорологическим оборудованием. Каждая станция собирает измерения псевдоаддитивности и фазы несущей от видимых спутников. Далее приёмник декодирует сигнал, чтобы получить навигационное сообщение и отправить всю эту информацию на MCS для обработки. Дополнительно каждая станция использует датчики для измерения давления, температуры и влажности, которые используются для моделей тропосферы. Метеорологические данные также отсылаются на MCS для обработки.

На момент написания работы, сегмент управления насчитывает 11 наземных антенных станций [4]. Эти антенны S-диапазона обеспечивают слежение, телеметрию и контроль спутников на основе команд от MCS. Наземные антенны устанавливают сеансы управления только

с одним спутником, в то время как MCS способна координировать сеансы управления одновременно для нескольких спутников путём использования различных наземных антенн. Помимо этого, наземные антенные станции отвечают за передачу навигационного сообщения, генерируемого MCS.

MCS находится на авиабазе Шривер (Колорадо) под управлением BBC США. Резервная MCS находится в городе Гейтерсберг (Мэриленд). Основная функция MCS заключается в создании и передаче навигационного сообщения спутниковому созвездию. Также MCS отвечает за ряд других задач: мониторинг месторасположения и состояния спутников, расчёт предполагаемых параметров часов и координат спутников, синхронизация GPST (GTS Time) и UTC, контроль целостности навигационного сообщения, проверка и регистрация навигационных данных, передаваемых в пользовательский сегмент, а также коррекция положения спутников для устранения орбитальных аномалий или перестройки созвездия в случае отказа одного из спутников.

Пользовательский сегмент

К пользовательскому сегменту GPS относятся все приёмники, способные принимать и декодировать сигналы спутников GPS. В настоящее время наиболее распространены два типа приёмников: одночастотные (бюджетные и неточные) и двухчастотные (более дорогие и точные).

1.2 Сигналы GPS

Сигналы GPS состоят из трёх основных компонентов: несущий сигнал, кода ранжирования и навигационного сообщения.

Несущая сигнала

Несущая сигнала представляет собой синусоидальную электромагнитную волну, которая колеблется на определённой частоте (частоте несущей). При своём распространении несущая подвергается различным частотно-зависимым эффектам, поэтому выбор частоты несущей играет принципиальную роль.

Средой распространения луча приёмник-спутник является атмосфера. Атмосфера может быть разделена на две области, которые оказывают значимое влияние на распространение электромагнитных волн. Эти области называются ионосферой и тропосферой. Основные ионосферные эффекты, такие как поглощение, групповая задержка, рефракция и другие, в первом приближении пропорциональны $\frac{1}{f^2}$, где f – частота несущей. Тропосферные же эффекты наоборот – становятся

более выраженными при высоких частотах. Таким образом, частота несущей должна находиться в определённом диапазоне: примерно от 10 МГц (ниже сигнал не проходит ионосферу) до 5 ГГц (выше сигнал значительно затухает в тропосфере). Это обуславливает тот факт, что сегмент управления для слеживания, телеметрии и контроля спутников использует S-диапазон (2-4 ГГц), а спутники передают свои сигналы в L-диапазоне (1-2 ГГц).

В настоящее время GPS использует три отдельных несущих, которые получаются от одного атомного тактового генератора с частотой $f_0 = 10,23$ МГц:

$$\begin{aligned}L1 &= 154 \times f_0 = 1575,42 \text{ МГц} \Rightarrow \lambda_{L1} = 19,0 \text{ см} \\L2 &= 120 \times f_0 = 1227,60 \text{ МГц} \Rightarrow \lambda_{L2} = 24,4 \text{ см} \\L5 &= 115 \times f_0 = 1176,45 \text{ МГц} \Rightarrow \lambda_{L5} = 25,5 \text{ см}\end{aligned}\quad (1.1)$$

Несущие L1 и L2 передаются всеми поколениями спутников GPS, а L5 – только спутниками Блока IIF и новее.

Код ранжирования

Код ранжирования также известный, как PseudoRaundom Noise (PRN) код, модулирует несущие сигналов GPS. PRN код представляет собой детерминированную битовую последовательность, доступ к которой имеют только приёмники GPS. Любые другие приёмники интерпретируют этот код, как случайный шум, поэтому игнорируют его.

PRN код уникален (ортогонален) для каждого спутника и бывает нескольких типов. Три изначальных кода – L1 C/A, L1 P(Y) и L2 P(Y) – передаются всеми спутниками с момента запуска GPS. Непрерывная модернизация GPS привела к появлению дополнительных PRN кодов, включая L1C, L2C, а также M кода для L1 и L2. В табл. 1 собрана информация о некоторых важных параметрах каждого существующего PRN кода.

Таблица 1
Характеристики текущих и будущих сигналов GPS [5].

Сигнал	Частота несущей, МГц	PRN код	Метод модуляции	Частота кода, МГц	Доступ
L1	1575,42	C/A	BPSK(1)	1,023	Гражданский
		L1C	MBOC(6,1,1/11)	1,023	
		P(Y)	BPSK(10)	10,23	Военный
		M	BOC(10,5)	5,115	
L2	1227,60	L2CM	BPSK(1)	0,5115	Гражданский
		L2CL			
		P(Y)	BPSK(10)	10,23	Военный
		M	BOC(10,5)	5,115	
L5	1176,45	L5I	QPSK(10)	10,23	Гражданский
		L5Q			

Навигационное сообщение

Помимо PRN кода, несущие сигналов GPS дополнительно модулируются навигационным сообщением с частотой 50 Гц, которое в себе содержит:

Эфемериды. Орбитальные данные (элементы Кеплера и параметры возмущения), используемые для предсказания траектории спутника.

Информацию о спутниковых часах. Коэффициенты полинома 2-ой степени, которые соответствуют смещению, дрейфу и скорости дрейфа (старения) атомных часов на борту спутника.

Информацию о состоянии спутника. Валидационные параметры, указывающие следует ли доверять сигналу спутника или нет.

Альманах. Эфемериды, информация о часах и состоянии всего спутникового созвездия, но с пониженной точностью.

Дополнительные параметры. Параметры ионосферной коррекции для одночастотных приёмников, данные для преобразования между GPST и UTC.

1.3 Измерения GPS

Существует три основных типа измерений GPS, которые доступны приёмнику: кодовые измерения (измерения псевдодальности), фазовые измерения (измерения фазы несущей) и измерения доплеровского сдвига частоты принятого сигнала. Все три типа измерений могут применяться для расчёта расстояния между спутником и приёмником, а доплеровский сдвиг также используется для определения скорости движения приёмника относительно спутника.

Псевдодальность

Временная задержка между передачей и приёмом сигнала может быть определена при помощи корреляционного анализа (приёмник сравнивает код, полученный от спутника, с кодом, который сгенерировал сам, путём сдвига во времени пока корреляция не станет максимальной). Поскольку электромагнитные волны распространяются со скоростью света в вакууме c , возможно определить расстояние (псевдодальность) между спутником s и приёмником r путём простого умножения временной задержки сигнала на c :

$$R_r^s = c(T_r - T^s) \quad (1.2)$$

где T_r – время приёма сигнала по часам приёмника; T^s – время передачи сигнала по часам спутника.

Если бы часы спутника и приёмника были идеально синхронизованы, то это была бы единственная необходимая информация для измерения псевдодальности. Однако на практике это невозможно, поэтому для решения проблемы синхронизации используется приведение времени к общей системе GPST:

$$\begin{aligned} T_r &= t_r + \delta_r \\ T^s &= t^s + \delta^s \end{aligned} \quad (1.3)$$

где t_r и δ_r – время и смещение времени приёма сигнала относительно GPST; t^s и δ^s – время и смещение времени передачи сигнала относительно GPST.

В дополнение к смещению времени существуют многочисленные другие источники ошибок e_r^s , которые ухудшают точность измерения псевдодальности. Таким образом, основная форма записи псевдодальности имеет вид:

$$R_r^s = \rho + c(\delta_r - \delta^s) + e_r^s \quad (1.4)$$

где $\rho = c(t_r - t^s)$ – истинное расстояние между спутником и приёмником.

Используя информацию о спутниковых часах, передаваемую в навигационном сообщении, можно учесть смещение времени спутника, т.е. $\delta^s \rightarrow 0$. Аналогично, благодаря эфемеридам, можно приблизительно получить месторасположение спутника в декартовых геоцентрических координатах x^s , y^s и z^s . Поэтому истинное расстояние между спутником и приёмником вычисляется по теореме Пифагора: $\rho = \sqrt{(x_r - x^s)^2 + (y_r - y^s)^2 + (z_r - z^s)^2}$ где x_r , y_r и z_r – декартовые геоцентрические координаты приёмника. С учётом всего этого выражение (1.4) сводится к виду:

$$R_r^s = \sqrt{(x_r - x^s)^2 + (y_r - y^s)^2 + (z_r - z^s)^2} + c\delta_r + e_r^s \quad (1.5)$$

Точность измерений псевдодальности составляет около 1% длины волны кода, что примерно соответствует 3 м для C/A кода и 0,3 м для P(Y) кода.

Фаза несущей

Другим типом измерений GPS является фаза несущей, которая при дальнейших выкладках полагается безразмерной (т.е. измеряется в циклах, а не радианах). Пусть в некоторый произвольный момент времени t_0 фаза волны равна ϕ_0 . Соответственно, разность фаз в момент времени t равна $\Delta\phi = \phi - \phi_0 = (t - t_0)f$, где f – частота сигнала.

Спутник передаёт сигнал, который имеет некоторую фазу $\phi^s(t) = \phi_0^s + \Delta\phi = \phi_0^s + (t - t_0)f^s$. При получении сигнала приёмник генерирует его копию на той же частоте, но с другой фазой $\phi_r(t) = \phi_{0,r} + \Delta\phi =$

$\phi_{0,r} + (t - t_0)f_r$. Также часы спутника и приёмника привязаны к GPST, поэтому ещё имеются дополнительные сдвиги фаз, которые равны $f^s\delta^s$ и $f_r\delta_r$. Следовательно, разность фаз между принятым сигналом и его копией равна:

$$\begin{aligned}\Delta\phi_r^s &= \phi_r(t) - \phi^s(t - \tau) \\ &= [\phi_{0,r} + (t - t_0)f_r + f_r\delta_r] - [\phi_0^s + (t - \tau - t_0)f^s + f^s\delta^s] \\ &= (f_r - f^s)t + f^s\tau + f_r\delta_r - f^s\delta^s + \Delta\phi_0\end{aligned}\quad (1.6)$$

где τ – время задержки (распространения) сигнала между спутником и приёмником; $\Delta\phi_0 = \phi_{0,r} - \phi_0^s$. Для простоты $\phi_{0,r}$ и ϕ_0^s можно выбрать в качестве опорных точек, т.е. положить $\phi_{0,r} = \phi_0^s = 0$, тем самым устраниТЬ слагаемое $\Delta\phi_0$.

Согласно выражению (1.1), частоты f_r и f^s получаются приёмником и спутником при помощи атомного тактового генератора на основе номинальной частоты f_0 . Поэтому вклад слагаемого $(f_r - f^s)t$ пренебрежимо мал и составляет порядка 10^{-14} . В силу цикличности фазы, частоты f_r и f^s могут быть просто аппроксимированы частотой f_0 . Таким образом, выражение (1.6) сводится к виду:

$$\Delta\phi_r^s = f_0\tau + f_0(\delta_r - \delta^s) \quad (1.7)$$

Когда приёмник измеряет фазу несущей, он способен различить только часть текущего полного цикла фаза. Иными словами, приёмник не знает какое целое число полных циклов N проделала фаза сигнала до момента приёма. Этот явление называется *фазовой неопределённостью*. В соответствии с этим, полная разность фаз несущей выражается как:

$$\Phi_r^s = \Delta\phi_r^s + N = f_0\tau + f_0(\delta_r - \delta^s) + N \quad (1.8)$$

Произведение Φ_r^s и длины волны несущей сигнала λ эквивалентно расстоянию между приёмником и спутником:

$$\lambda\Phi_r^s = c\tau + c(\delta_r - \delta^s) + \lambda N \quad (1.9)$$

где $c = f_0\lambda$.

Измерения фазы несущей также подвержены различным ошибкам e_r^s . Если учесть этот факт, а также сравнить выражения (1.4) и (1.9), то расстояние между приёмником и спутником будет равно:

$$\lambda\Phi_r^s = R_r^s + \lambda N + e_r^s \quad (1.10)$$

Чтобы фаза несущей могла использоваться для позиционирования, фазовая неопределённость должна быть устранена (например, при помощи фильтра Калмана). В таком случае, точность расстояния по измерениям фазы несущей гораздо выше, чем псевдодальности, и составляет около 1% длины волны несущей, что примерно соответствует 2 мм для L1 и 2,4 мм для L2.

Доплеровский сдвиг

Для определения своей скорости приёмник использует доплеровский сдвиг частоты, который определяется как:

$$f_D(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{v(t)}{\lambda} \quad (1.11)$$

где $f_D(t)$ – частота Доплера; $\phi(t)$ – фаза принятого сигнала; $v(t)$ – относительная скорость приёмника.

Если взять производную по времени обеих сторон выражения (1.10), то получится скорость приёмника относительно спутника:

$$\lambda D_r^s = \lambda \dot{\Phi}_r^s = \dot{R}_r^s + \dot{e}_r^s = \dot{\rho} + c(\dot{\delta}_r - \dot{\delta}^s) + \dot{e}_r^s \quad (1.12)$$

где D_r^s – измерения приёмника доплеровского сдвига; $\dot{\delta}_r$ и $\dot{\delta}^s$ – дрейфы часов приёмника и спутника. Стоит отметить, что слагаемое λN , соответствующее фазовой неопределённости, не зависит от времени, поэтому в последнем выражении отсутствует.

Измерения доплеровского сдвига также подвержены ошибкам. Их точность составляет около 0,001 Гц, что примерно соответствует 2×10^{-4} м/с для L1.

В дополнение к роли определения скорости, доплеровский сдвиг может использоваться для позиционирования, т.е. определения расстояния. Для этого используется величина, известная как *интегральный доплеровский счёт*. Однако она используется реже, чем измерения псевдодальности или фазы несущей, потому что требует очень стабильных осцилляторов приёмника и длительных по времени (до нескольких часов) наблюдений спутника.

1.4 Источники ошибок GPS

Многочисленные физические эффекты вносят свой вклад в точность измерений GPS. Источники ошибок GPS можно сгруппировать в три категории, которые связаны с: спутником, распространением сигнала и приёмником. В табл. 2 приведена такая классификация несколько наиболее важных источников ошибок GPS. С другой стороны, ошибки можно разделить на систематические (biases) и случайные. Большинство ошибок GPS являются систематическими, включая атмосферные эффекты, эффект многолучёвости и сдвиг фазового центра антенны приёмника. Основным источником случайных ошибок является шум приёмника, его最难 более трудно прогнозировать и моделировать.

Ошибки GPS могут быть учтены при помощи параметров коррекции или устранены с использованием различных методов позиционирования. Параметры коррекции, например, могут передаваться в навигационном

Таблица 2

Классификация источников ошибок GPS.

Категория	Источник ошибки
Спутник	Ошибка часов Ошибки эфемерид
Распространение сигнала	Ионосферные эффекты Тропосферные эффекты
Приёмник	Ошибка часов Эффект многолучёвости Сдвиг фазового центра антенны Шум приёмника

сообщении, предоставляется службой IGS или рассчитываются атмосферными моделями. Однако они учитывают только определённую часть ошибок. Например, модель Клобучара устраняет около половины вклада ионосферных ошибок. Параметры часов и эфемерид доступны с различной степенью точности. Кроме того, благодаря комбинации метода относительного позиционирования и двухчастотных приёмников, некоторые ошибки могут быть устраниены полностью. Например, разность измерений двух приёмников может полностью устраниить ошибки, связанные со спутником, а разность измерений двух спутников – ошибки приёмника. Метод двойных разностей (double difference), т.е. с участием двух приёмников и двух спутников, может эффективно использоваться для устранения всех аппаратных ошибок. Далее, кратко рассмотрим основные источники ошибок GPS.

Ошибки часов и эфемерид

Смещение, дрейф и скорость дрейфа часов каждого спутника GPS передаётся в навигационном сообщении. Эта информация представлена в виде коэффициентов полинома 2-ой степени:

$$\delta^s = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2 \quad (1.13)$$

где t_0 – эталонная эпоха; a_0 , a_1 и a_2 – смещение, дрейф и скорость дрейфа часов спутника. Их типичные значения: $a_0 < 1$ мкс, $a_1 \approx 10^{-11}$ и $a_2 \approx 0 \text{ c}^{-1}$ [6]. Сегмент управления GPS постоянно отслеживает эти параметры и каждые два часа отправляет их обновленные значения всей группировке спутников. Эталонная эпоха t_0 соответствует последнему времени обновления. Такие параметры обычно устраняют ошибку часов спутника в переделах 5 нс. Более точные параметры, например от IGS, могут повысить точность до 75 пс (75×10^{-12} с).

Атомные часы стоят дорого, поэтому многие приёмники GPS используют более дешёвые альтернативные варианты, такие как

кварцевые часы. Однако кварцевые часы менее стабильны, чем атомные. Величина их дрейфа составляет порядка от 10^{-10} до 10^{-8} . Несмотря на это, приёмник GPS может сам оценить сдвиг и дрейф собственных часов. На основе этих оценок, он использует определённые методы их устранения [7]. Один из таких методов “управляет” генератором часов, непрерывно сводя дрейф к нулю. Это поддерживает постоянное смещение времени в пределах уровня шума, что обеспечивает его простую коррекцию. Второй (более распространённый) метод позволяет приёмнику вводить дискретные скачки времени, чтобы устраниТЬ накопленное смещение. Смещение часов приёмника может быть оценено и компенсировано с точность до 1 мкс, что соответствует ошибке измерения дальность около 300 м. Эта ошибка, очевидно, неприемлема для подавляющего большинства приложений GPS, поэтому необходимо использовать методы для устранения остаточного смещения. Как правило, ошибка часов приёмника δ_r включается неизвестной в уравнения измерений. Также можно использовать разностные методы.

Эфемериды спутников, передаваемые в навигационном сообщении, могут незначительно отличаться от истинных параметров орбит. Более точные эфемериды предоставляются различными службами ГНСС, включая IGS. В прошлом ошибки широковещательных эфемерид приводили к нескольким метрам ошибки позиционирования. Для решения этой проблемы были предприняты многочисленные усилия, которые в значительной степени оказались оправданными. В отчёте за 2012-2013 годы было установлено, что созвездие GPS имеет среднее значение SISRE (Signal In Space Ranging Error), равное 0,7 м [8]. Для коротких базовых линий также можно использовать метод дифференциального позиционирования.

Релятивистские эффекты

Эффект замедления времени из-за специальной теории относительности вызывает отклонение номинальной частоты сигнала [9]:

$$\frac{f'_0 - f_0}{f_0} = -4,464 \times 10^{-10} \quad (1.14)$$

Это отклонение выглядит несущественным, но эффект накапливается, поэтому вносимая ошибка становится большой. Можно оценить насколько часы спутника будут дрейфовать относительно часов на Земле в течение одного дня: $-4,464 \times 10^{-10} \times 60 \times 60 \times 24 \approx -38,6$ мкс/день. Эта временная задержка, умноженная на скорость света в вакууме c , соответствует ошибке расстояния, равной 11,6 км/день.

Вращение Земли тоже вызывает ошибку, которую необходимо учитывать. В геоцентрической инерциальной системе координат вращение учитывается через “коррекцию пути”, которая определяется

движением приёмника между передачей и приёмом сигнала:

$$\Delta\rho = \frac{(\vec{r}_r - \vec{r}^s) \cdot \vec{v}_r}{c} \quad (1.15)$$

где \vec{r}_r и \vec{r}^s – геоцентрические радиус-векторы приёмника и спутника; \vec{v}_r – вектор скорости приёмника (учитывает скорость из-за вращения Земли и кинематическую скорость относительно поверхности Земли). Величина коррекции пути может составлять до 30 м [10].

Дополнительные релятивистские эффекты, которые связаны с эксцентриситетом орбиты спутника и искривлением пространства-времени (общей теорией относительности) достаточно малы, поэтому в большинстве случаев ими можно пренебречь.

Wind-up эффект

Wind-up эффект влияет только на измерения фазы несущей и возникает в волнах с круговой поляризацией. Так как все сигналы GPS имеют правую круговую поляризацию, то wind-up эффект, который хоть и невелик, должен быть учтён. Этот эффект зависит от относительной ориентации антенн спутника и приёмника, а также от вектора линии видимости (Line Of Sight, LOS) между ними. Суть эффекта заключается в следующем. Когда спутник вращается вокруг Земли, он должен постоянно переориентироваться, чтобы его солнечные панели получали максимум энергии от Солнца. Это вращение создает изменение фазы, которое приёмник интерпретирует, как изменение расстояния.

Атмосферные эффекты

Как ионосферные, так и тропосферные эффекты оказывают влияние на точность позиционирования GPS, но в данной работе более подробно будут рассмотрены только первые из них (см. ГЛАВА 2.1).

Эффекты многолучёвости, дифракции и интерференции

Эффект многолучёвости возникает, если сигнал от спутника к приёмнику приходит несколькими разными оптическими путями (например, из-за отражения). Как правило, прямой и отражённый сигнал приходят на приёмник в немного разное время из-за разной длины пути, как показано на рис. 1 (a). В некоторых случаях прямой сигнал может быть полностью перекрыт, тогда на приёмник приходит только отражённый сигнал, как показано на рис. 1 (b). Длина пути отражённого сигнала больше, чем прямого. Это приводит к ошибке позиционирования приёмника. Ошибка многолучевого распространения при использовании псевдодальности, как правило, составляет около 10-20 м [11], хотя в отдельных случаях может достигать 100 м [12]. Ошибка многолучевого распространения при измерениях фазы несущей

намного меньше и обычно составляет не более 1 см [9]. Общей аналитической модели многолучевого распространения не существует, т.к. эффект многолучёвости сильно зависит от местности и угла прихода сигнала, который меняется при движении спутника. При наличии нескольких отражателей, например, как в плотной городской среде, многолучевое распространение становится слишком сложным и моделируется статистически [13]. Также для устранения эффекта многолучёвости можно использовать приёмные антенны специальной конструкции (например, дроссельные кольцевые антенны) или метод дифференциального позиционирования.

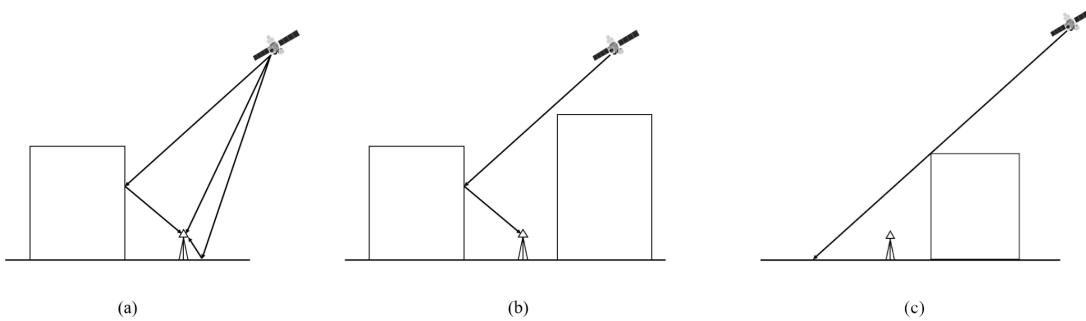


Рис. 1. Возможные пути сигнала от спутника до приёмника [6].

В некоторых случаях, например, как показано на рис. 1 (с), приёмник может быть полностью закрыт от всех прямых и отражённых сигналов. Тем не менее из-за эффекта дифракции сигнал все равно будет поступать на приёмник. Дифрагированный сигнал проходит намного более длинный путь, чем геометрическое расстояние между приёмником и спутником. Таким образом, ошибка позиционирования может составлять от нескольких сантиметров до дециметров [6]. Для устранения этого источника ошибки используются модели дифракционных эффектов (например, модель SIGMA-б [14]).

Когда две волны накладываются в пространстве, их амплитуды в каждой точке суммируются. Этот эффект называется интерференцией. Существует два типа интерференции: конструктивная (когда максимум одной волны совпадает с максимумом другой волны, амплитуда результирующей волны увеличивается) и деструктивная (когда максимум одной волны совпадает с минимумом другой волны, амплитуда результирующей волны уменьшается). При позиционировании особое значение имеет деструктивная интерференция, потому что она уменьшает отношение сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR). Для избежания этой проблемы GPS использует методы расширения спектра, т.е. распределяет мощности сигналов в определённых полосах пропускания (2,046 МГц для С/A кода и 20,46 МГц для Р кода).

Аппаратные ошибки

Помимо ошибок часов спутника и приёмника существует ряд других аппаратных ошибок. К ним относятся смещение фазового центра антенны, инструментальные ошибки и шум.

До сих пор полагалось, что антенны спутника и приёмника являются точечными. В действительности же этого не так. Поэтому возникает следующий вопрос: какую точку антенны следует использовать при измерении расстояния? Эта точка называется фазовым центром антенны (Antenna Phase Center, APC). Соответственно, расстояние между спутником и приёмником определяется, как расстояние между фазовыми центрами их антенн. Смещение фазового центра антенны обычно составляет от миллиметров до сантиметров [6].

При прохождении сигнала через комплектующие приёмника и спутника возникают так называемые инструментальные ошибки. Эти ошибки отличаются для каждого типа измерений GPS и зависят от частоты сигнала. Инструментальные ошибки могут быть смоделированы в общем виде следующим образом [15]:

$$\begin{aligned} d_c &= d_{c,i}(f) + d_c^j(f) \\ d_p &= d_{p,i}(f) + d_p^j(f) \\ d_d &= d_{d,i}(f) + d_d^j(f) \end{aligned} \quad (1.16)$$

где f – частота сигнала; индексы c , p и d соответствуют кодовым, фазовым и доплеровским измерениям приёмника; индексы i и j соответствуют номеру приёмника и спутника. Инструментальные ошибки могут быть устраниены, например, путём использования метода относительного позиционирования.

Источники случайных ошибок выключают в себя помехи в кабелях, усилителях и антенне приёмника, тепловые шумы, динамическое напряжение и т.д. Полностью избежать шума невозможно, но для снижения его уровня можно использовать такие методы, например, как фильтрация низких частот. Современные приёмники способны уменьшить шумовую компоненту ошибки позиционирования вплоть до миллиметрового и ниже уровня [6].

Геометрия спутников

На точность позиционирования также влияет геометрическое расположение спутников, видимых приёмнику: чем больше спутники разнесены относительно друг друга в пространстве, тем лучше (ошибка меньше). Для характеристики этого эффекта используется коэффициент DOP (Dilution Of Precision). Геометрическая интерпретация DOP для двумерного случая изображена на рис. 2.

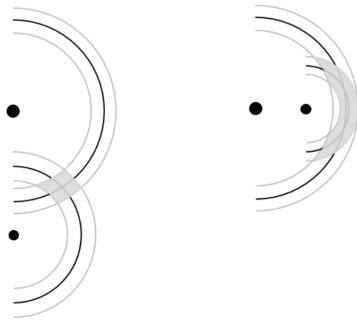


Рис. 2. Геометрическая интерпретация DOP [6]. Точками обозначены спутники, чёрные полуокружности представляют собой истинное расстояние до приёмника, а серые полуокружности – расстояние с учётом погрешности.

На значение DOP умножаются все остальные типы ошибок. В теоретическом идеальном случае DOP равен 1. Однако на практике DOP редко бывает меньше 2, а в отдельных случаях может достигать даже 20 [16]. DOP минимизируется самим приёмником путём выбора оптимальной комбинации видимых спутников.

Другие источники ошибок

Выше были рассмотрены наиболее важные источники ошибок, но этот список не является полностью исчерпывающим. Существует множество других физических эффектов, которые вносят небольшие ошибки в точность позиционирования. Одним из таких эффектов является деформация земной коры под влиянием приливообразующих сил [5, 15].

1.5 Принцип позиционирования GPS

Принцип позиционирования GPS довольно прост. Рассмотрим приёмник, который измеряет до определённого спутника расстояние R_1 , чьё месторасположение известно из эфемерид, передающихся в навигационном сообщении. Приёмник знает, что он должен находиться где-то на поверхности сферы радиуса R_1 . Если добавить расстояние до второго спутника R_2 , то приёмник будет знать, что он должен находиться не только на поверхности сферы радиуса R_1 , но и на поверхности сферы радиуса R_2 , т.е. на пересечении двух сфер (окружности). Наконец, если добавить расстояние до третьего спутника R_3 , то третья сфера будет пересекать первые две. В итоге, все три сферы будут пересекаться только в двух точках, как показано на рис. 3. Одна из этих точек даёт бессмысленное решение навигационной задачи, например, она может находиться слишком далеко от поверхности Земли или двигаться с нереальной скоростью. Следовательно, приёмник может

просто отбросить эту точку, тем самым определить своё истинной месторасположение.

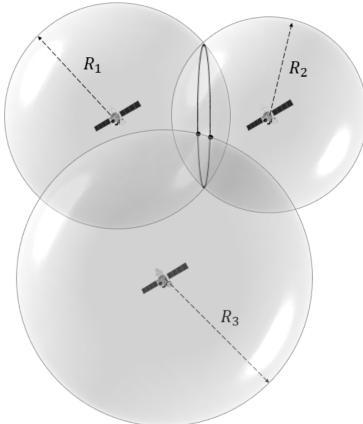


Рис. 3. Визуализация GPS позиционирования [6].

В теории, для позиционирования необходимы только три спутника, как в примере приведённом выше. Однако это относится только к безошибочным измерениям. Большинство источников ошибок (см. ГЛАВА 1.4) могут быть смоделированы и учтены, но ошибка часов приёмника вместо этого должна выступать четвертой неизвестной переменной. Таким образом, на практике для позиционирования требуется дополнительный четвёртый спутник.

Приёмник GPS может вычислить своё расстояние до спутника при помощи нескольких типов измерений (см. ГЛАВА 1.3), а именно псевдодальности, фазы несущей и доплеровского сдвига. В качестве примера рассмотрим технику позиционирования на основе измерений псевдодальности.

Подводя итог, схема процесса позиционирования состоит из следующих шагов:

1. Спутник генерирует несущую частоту и модулирует её кодом ранжирования (PRN кодом) и навигационным сообщением. PRN код включает в себя информацию о времени передачи сигнала.
2. Сгенерированный сигнал движется к поверхности Земли со скоростью света в вакууме.
3. Приёмник получает сигнал и измеряет время его прихода.
4. Приёмник декодирует PRN код для получения времени передачи сигнала и навигационное сообщение для получения эфемерид (координат) спутника.
5. Используя всю эту информацию, приёмник рассчитывает псевдодальность до спутника.
6. Эта процедура выполняется по крайней мере для четырёх спутников одновременно, тем самым приёмник определяет своё месторасположения.

Учитывая важные источники ошибок, можно исключить e_r^s из выражения (1.5):

$${}^*R_r^s = \sqrt{(x_r - x^s)^2 + (y_r - y^s)^2 + (z_r - z^s)^2} + c\delta_r \quad (1.17)$$

где ${}^*R_r^s$ – так называемая ОМС (Observed Minus Computed) псевдодальность. При всех дальнейших выкладках будут подразумеваться именно ОМС измерения, но знак звёздочки для простоты будет опущен. В таком случае система уравнений выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} R_r^{(1)} = \sqrt{(x_r - x^{(1)})^2 + (y_r - y^{(1)})^2 + (z_r - z^{(1)})^2} + c\delta_r \\ R_r^{(2)} = \sqrt{(x_r - x^{(2)})^2 + (y_r - y^{(2)})^2 + (z_r - z^{(2)})^2} + c\delta_r \\ R_r^{(3)} = \sqrt{(x_r - x^{(3)})^2 + (y_r - y^{(3)})^2 + (z_r - z^{(3)})^2} + c\delta_r \\ R_r^{(4)} = \sqrt{(x_r - x^{(4)})^2 + (y_r - y^{(4)})^2 + (z_r - z^{(4)})^2} + c\delta_r \end{cases} \quad (1.18)$$

В текущей форме эта система уравнений является нелинейной и трудно разрешимой. Для её линеаризации можно использовать разложение в ряд Тейлора, что позволит использовать матричные методы для поиска решения.

Уравнение псевдодальности является функций четырёх переменных, поэтому разложение в ряд Тейлора должно выполняться для каждой переменной отдельно. Также необходимо сделать первоначальную оценку ошибки часов и положения приёмника. Элементы этого начального вектора $\vec{x}_0 = [x_{r,0} \ y_{r,0} \ z_{r,0} \ \delta_{r,0}]^T$ будут служить точками, относительно которых выполняется разложение. Таким образом, разложение в ряд Тейлора уравнения псевдодальности определяется выражением:

$$\begin{aligned} R_r^s &= R_{r,0}^s + \frac{\partial R_{r,0}^s}{\partial x_r}(x_r - x_{r,0}) + \frac{\partial R_{r,0}^s}{\partial y_r}(y_r - y_{r,0}) \\ &\quad + \frac{\partial R_{r,0}^s}{\partial z_r}(z_r - z_{r,0}) + \frac{\partial R_{r,0}^s}{\partial \delta_r}(\delta_r - \delta_{r,0}) \end{aligned} \quad (1.19)$$

где $R_{r,0}^s = \sqrt{(x_{r,0} - x^s)^2 + (y_{r,0} - y^s)^2 + (z_{r,0} - z^s)^2} + c\delta_{r,0}$ – начальное измерение псевдодальности. Если теперь определить $\Delta R_r^s = R_r^s - R_{r,0}^s$, $\Delta x = x_r - x_{r,0}$, $\Delta y = y_r - y_{r,0}$, $\Delta z = z_r - z_{r,0}$ и $\Delta \delta_r = \delta_r - \delta_{r,0}$, то можно

переписать систему уравнений (1.18) в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} \Delta R_r^{(1)} \\ \Delta R_r^{(2)} \\ \Delta R_r^{(3)} \\ \Delta R_r^{(4)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial R_{r,0}^{(1)}}{\partial x_r} & \frac{\partial R_{r,0}^{(1)}}{\partial y_r} & \frac{\partial R_{r,0}^{(1)}}{\partial z_r} & \frac{\partial R_{r,0}^{(1)}}{\partial \delta_r} \\ \frac{\partial R_{r,0}^{(2)}}{\partial x_r} & \frac{\partial R_{r,0}^{(2)}}{\partial y_r} & \frac{\partial R_{r,0}^{(2)}}{\partial z_r} & \frac{\partial R_{r,0}^{(2)}}{\partial \delta_r} \\ \frac{\partial R_{r,0}^{(3)}}{\partial x_r} & \frac{\partial R_{r,0}^{(3)}}{\partial y_r} & \frac{\partial R_{r,0}^{(3)}}{\partial z_r} & \frac{\partial R_{r,0}^{(3)}}{\partial \delta_r} \\ \frac{\partial R_{r,0}^{(4)}}{\partial x_r} & \frac{\partial R_{r,0}^{(4)}}{\partial y_r} & \frac{\partial R_{r,0}^{(4)}}{\partial z_r} & \frac{\partial R_{r,0}^{(4)}}{\partial \delta_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \delta_r \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

С учётом того, что $\frac{\partial R_{r,0}^s}{\partial x_r} = \frac{x_{r,0} - x^s}{\rho_{r,0}^s}$, $\frac{\partial R_{r,0}^s}{\partial y_r} = \frac{y_{r,0} - y^s}{\rho_{r,0}^s}$, $\frac{\partial R_{r,0}^s}{\partial z_r} = \frac{z_{r,0} - z^s}{\rho_{r,0}^s}$ и $\frac{\partial R_{r,0}^s}{\partial \delta_r} = c$, где $\rho_{r,0}^s = \sqrt{(x_{r,0} - x^s)^2 + (y_{r,0} - y^s)^2 + (z_{r,0} - z^s)^2}$, система уравнений (1.20) имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \Delta R_r^{(1)} \\ \Delta R_r^{(2)} \\ \Delta R_r^{(3)} \\ \Delta R_r^{(4)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_{r,0} - x^{(1)}}{\rho_{r,0}^{(1)}} & \frac{y_{r,0} - y^{(1)}}{\rho_{r,0}^{(1)}} & \frac{z_{r,0} - z^{(1)}}{\rho_{r,0}^{(1)}} & c \\ \frac{x_{r,0} - x^{(2)}}{\rho_{r,0}^{(2)}} & \frac{y_{r,0} - y^{(2)}}{\rho_{r,0}^{(2)}} & \frac{z_{r,0} - z^{(2)}}{\rho_{r,0}^{(2)}} & c \\ \frac{x_{r,0} - x^{(3)}}{\rho_{r,0}^{(3)}} & \frac{y_{r,0} - y^{(3)}}{\rho_{r,0}^{(3)}} & \frac{z_{r,0} - z^{(3)}}{\rho_{r,0}^{(3)}} & c \\ \frac{x_{r,0} - x^{(4)}}{\rho_{r,0}^{(4)}} & \frac{y_{r,0} - y^{(4)}}{\rho_{r,0}^{(4)}} & \frac{z_{r,0} - z^{(4)}}{\rho_{r,0}^{(4)}} & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \delta_r \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

Или в более краткой форме:

$$\vec{y}_1 = \mathbf{A} \vec{x}_{\Delta,1} \quad (1.22)$$

где \vec{y}_1 – известный вектор; \mathbf{A} – расчётная матрица; $\vec{x}_{\Delta,1}$ – неизвестный вектор. Следовательно, чтобы найти неизвестный вектор $\vec{x}_{\Delta,1}$ достаточно просто умножить левую часть уравнения (1.22) на \mathbf{A}^{-1} :

$$\vec{x}_{\Delta,1} = \mathbf{A}^{-1} \vec{y}_1 \quad (1.23)$$

Следует обратить внимание, что обратная матрица \mathbf{A}^{-1} всегда существует, потому что уравнения псевдодальности, соответствующие разным спутникам, линейно независимы.

Теперь для новой оценки ошибки часов и положения приёмника можно использовать:

$$\vec{x}_1 = \vec{x}_0 + \vec{x}_{\Delta,1} \quad (1.24)$$

Элементы вектора \vec{x}_1 также можно использовать в качестве точек разложения в ряде (1.19). Это, в свою очередь, приведёт к новым векторам \vec{y}_2 и $\vec{x}_{\Delta,2}$ и так далее. Таким образом, решение (1.24) можно можно обобщить в виде:

$$\vec{x}_n = \vec{x}_{n-1} + \vec{x}_{\Delta,n} \quad (1.25)$$

При каждом новом шаге элементы вектора $\vec{x}_{\Delta,n}$ уменьшаются (стремятся к нулю), поэтому итеративное решение можно продолжать вплоть до тех пор, пока \vec{y}_n не станет равен \vec{x}_n . Это и будет соответствовать истинному месторасположению приёмника.

Строго говоря, элементы $\vec{x}_{\Delta,n}$ никогда не будут точно равны нулю, но алгоритм приёмника может быть установлен на прекращение, когда $|\vec{x}_{\Delta,n}|$ будет меньше определённого порогового значения, например, 1 см.

ГЛАВА 2

МЕТОДЫ УЧЁТА ВЛИЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ В ЗАДАЧАХ ПРИЦЕЗИОННОГО GPS ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Precise Point Positioning (PPP) – это метод абсолютного позиционирования, который использует кодовые или фазовые измерения сигнала в комбинации с точными эфемеридами спутников [2]. С момента полного отключения режима SA¹ (Selective Availability), основным источником ошибки PPP является задержка сигнала в ионосфере. В настоящее время существуют несколько методов коррекции ионосферной задержки, которые могут применяться как по отдельности, так и вместе. В связи с тем, что ионосфера является дисперсионной средой, то величина ионосферной задержки зависит от частоты сигнала. Поэтому пользователи двухчастотных приёмников практически полностью (до 99,9%, что соответствует вкладу ионосферной ошибки 1-го порядка) могут устранить ионосферную ошибку путём комбинирования кодовых или фазовых измерений сигнала на разных частотах. Пользователи же более дешёвых одночастотных приёмников должны применять другие методы. Например, использовать ионосферные модели или применять разностные методы.

2.1 ИОНОСФЕРА И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА СИГНАЛЫ GPS

Ионосфера – это область верхней атмосферы Земли на высотах примерно от 50 км до 1000 км и более, в которой количество свободных электронов достаточно, чтобы оказывать влияние на распространение электромагнитных волн, в частности сигналов GPS.

Главным механизмом образования свободных электронов в ионосфере является ионизация. Ионизация – это процесс, при котором электрически нейтральный атом или молекула теряет либо приобретает электрон, что приводит к образованию положительного или отрицательного иона, соответственно. В верхних слоях атмосферы высокоэнергетичные солнечные фотоны сталкиваются с частицами газа, лишают их электронов и ионизируют их. Фотоионизация или ионизация под действием электромагнитных волн может быть математически представлена уравнением:

$$a + \frac{hc}{\lambda} \rightarrow a^+ + e^- \quad (2.1)$$

где a – произвольная нейтральная частица; $\frac{hc}{\lambda}$ – энергия падающего

¹Режим искусственного снижения точности GPS. Полностью отключен правительством США с 1 мая 2000 года.

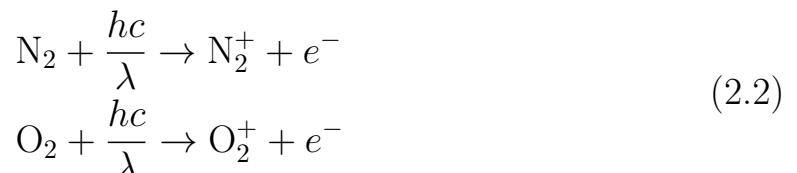
фотона с длиной волны λ ; a^+ – положительный ион; e^- – электрон. Этот процесс происходит только в том случае, если энергия падающего фотона превышает энергию ионизации частицы. Точка, когда энергия фотона равна энергии ионизации называется пределом ионизации. Поскольку энергия фотона обратно пропорциональна его длине волны, предел ионизации может быть выражен в единицах измерения длин волн. Если длина волны падающего фотона меньше предела ионизации, то атом или молекула будут ионизованы. Пределы ионизации нескольких химических веществ, распространённых в ионосфере, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Пределы ионизации химических веществ, присутствующих в ионосфере [17].

Элемент	Предел ионизации, нм
N ₂	79,6
O	91,1
H	91,1
O ₂	102,7
NO	134

Безусловно, наиболее распространёнными химическими веществами в атмосфере являются молекулярный азот (N₂) и молекулярный кислород (O₂). Эти молекулы могут быть ионизованы посредством следующих реакций:



Образовавшиеся положительные ионы могут диссоциативно рекомбинировать со свободными электронами. Это приводит к двум нейтральным атомам, как показано в следующих реакциях:



Атомный кислород может быть ионизирован сам, либо может участвовать в реакции замещения с N₂⁺:



Ионы атомарного кислорода могут принимать участие в реакциях

замещения с N_2 или O_2 :



И наконец, ионы оксида азота могут диссоциативно рекомбинировать:



Ряд физических и химических процессов информирует об относительном количестве каждого вида иона на определённой высоте. Хотя атмосфера богата N_2 , ионы N_2^+ не существуют в больших количествах, т.к. они очень быстро реагируют с помощью уравнений (2.3) и (2.4). На малых высотах, где молекулярная плотность высока, преобладают молекулы N_2 и O_2 . Ионы O^+ быстро реагируют с этими молекулами согласно уравнениям (2.5). Прямая ионизация NO образует NO^+ , но атмосфера не богата на NO . Несмотря на это, NO^+ существует в изобилии на малых высотах из-за реакций (2.4) и (2.5). На больших высотах N_2 и O_2 встречаются реже, поэтому реакции (2.5) менее вероятны. Когда они происходят, образующиеся ионы NO^+ и O_2^+ быстро рекомбинируют с большим числом свободных электронов посредством реакций (2.3) и (2.6). Молекулярные ионы могут быстро и легко рекомбинировать с электронами посредством диссоциативной рекомбинации, но этот механизм не доступен для атомарных ионов. Поэтому атомарные ионы могут излучать энергию в виде света. Этот процесс называется излучательной рекомбинацией. Излучательная рекомбинация неэффективна и происходит гораздо реже, чем диссоциативная рекомбинация. Также ионы могут рекомбинировать через столкновения. Согласно законам сохранения импульса и энергии, а также принципам квантовой механики, для рекомбинации в столкновении должны участвовать три атомарных иона и только два молекулярных иона [17]. На малых высотах столкновения как двух, так и трёх ионов происходят с некоторой регулярностью из-за высокой плотности атмосферы. На больших высотах столкновения трёх ионов становится гораздо реже. Поэтому O^+ будет менее часто рекомбинировать, чем N_2^+ , O_2^+ и NO^+ . Таким образом, на малых высотах наиболее распространены ионы O_2^+ и NO^+ , а также присутствуют N_2^+ . Эти молекулярные ионы доминируют примерно до 200 км, после чего доминирующим ионом становится O^+ [17].

Обычно ионосфера делится на три слоя, которые называются D, E и F. Эти обозначения были введены Э.В. Эплтоном в 1920-х годах. Эплтон был первым, кто экспериментально подтвердил существование ионосферы, продемонстрировав, что радиоволны могут отражаться от верхней атмосферы. Первый обнаруженный слой Эплтон назвал буквой E, чтобы подчеркнуть тот факт, что электрические поля были отражены.

Впоследствии он обнаружил ещё два дополнительных слоя: один выше слоя E, который обозначил буквой F, а другой ниже слоя E, который обозначил буквой D. С тех пор было обнаружено, что слой F может делиться на ещё две области, которые имеют разные свойства: F1 и F2. Следуя тому же принципу, слой E иногда делится на области E1 и E2, хотя это редко встречается в литературе. Самую низкую часть ионосферы иногда называют слоем C, но этот слой не важен для большинства приложений, поэтому он либо включается в слой D, либо полностью игнорируется. Концентрация свободных электронов непрерывно изменяется с высотой, поэтому определение слоёв является произвольным. Их границы определяются прежде всего различиями в химическом составе и физических процессах ионосферы. Эти факторы очень динамичны и значительно зависят от широты, времени суток, времени года и цикла солнечной активности. Таким образом, границы каждого слоя могут быть определены только приблизительно и варьируются в пределах 10-20 км.

Слой C – самый нижний слой ионосферы, расположенный на высотах примерно 50-70 км над поверхностью Земли. На эту глубину способны проникать только фотоны очень высоких энергий (космические гамма-лучи с энергией МэВ и более). Эти фотоны способны ионизировать все химические вещества в атмосфере. Солнце лишь изредка излучает гамма-лучи, например, во время солнечных вспышек, которые вызывают внезапные ионосферные возмущения (Sudden Ionospheric Disturbances, SID). SID обычно делятся около получаса [17], но тем не менее могут вызывать проблемы для распространения радиоволн. Обычно гамма-лучи испускаются от далёких чёрных дыр, квазаров, сверхновых и нейтронных звёзд. Тем не менее их поток довольно мал² и составляет $\mathcal{O}(10^{-12})$ эрг см² с⁻¹ (1 эрг с⁻¹ = 10⁻⁷ Вт).

Слой D – область ионосферы на высотах примерно 70-90 км над поверхностью Земли. На эту глубину могут проникать фотоны с длиной волны 1 нм и меньше. Это означает, что помимо гамма-лучей жёсткое рентгеновское излучение ($\lambda = 0,1 \div 1$ нм), способное ионизировать N₂ и O₂, также достигает слоя D. Поток солнечного рентгеновского излучения зависит от солнечной активности, которая включает в себя 11-летний цикл, а также солнечные вспышки. Поскольку в течение солнечного цикла поток рентгеновского излучения в большинстве случаев мал, первичный источник ионизации в слое D, на самом деле, обусловлен спектральной линией водорода, проходящей через окно сечения поглощения O₂ [17]. Эта спектральная линия (Лайман- α) имеет длину волны 126,6 нм и способна ионизировать оксид азота (NO) в атмосфере. Хотя NO относительно менее распространён, чем N₂ и

²Для сравнения: общий солнечный поток на всех длинах волн в верхней части атмосферы составляет $\mathcal{O}(10^6)$ эрг см² с⁻¹.

O_2 , большой поток Лайман- α ($5 \text{ эрг см}^2 \text{ с}^{-1}$) способен продуцировать значительное количество ионов NO^+ . На высотах слоя D наиболее распространёнными ионами являются NO^+ и O_2^+ , в то время как O^+ и N_2^+ существуют в меньших количествах. Водяной пар присутствует на высотах ниже примерно 85 км и может взаимодействовать с NO^+ , образуя более крупные молекулярные ионы, такие как H_3O^+ , $H_5O_2^+$ и $H_7O_4^+$. Процессы рекомбинации и присоединения играют важную роль для слоя D. Высокая плотность приводит к большому количеству столкновений. Ночью электроны могут присоединиться к нейтральным молекулам с образованием отрицательных ионов, которые впоследствии могут рекомбинировать с положительными ионами. По этой причине электронные потери в D слое относительно велики. Тем не менее в течение дня эти потери в некоторой степени компенсируются. Как результат, слой D имеет более низкую электронную концентрацию, чем слои E и F, которая составляет примерно $10^8 \div 10^9 \text{ м}^{-3}$ в зависимости от солнечной активности. Ночью при отсутствии солнечного излучения процессы рекомбинации и присоединения приводят к тому, что слой D почти полностью исчезает, и лишь небольшая часть ионизации остаётся из-за космических лучей.

Слой E простирается на высотах примерно 90-140 км над поверхностью Земли. Мягкое рентгеновское излучение ($\lambda = 1 \div 10 \text{ нм}$) и экстремальное ультрафиолетовое (Extreme UltraViolet, EUV) излучение с $\lambda = 91,2 \div 102,6 \text{ нм}$ постоянно проникают на эту глубину и вызывают ионизацию. Стоит отметить, что излучения с $\lambda = 10 \div 91,1 \text{ нм}$ также теоретически способны проникать на эту глубину, но на практике они сильно поглощаются слоями F1 и F2. В спектр EUV включена линия излучения Лайман- β с $\lambda = 102,6 \text{ нм}$, способная ионизировать O_2 . Ионы NO^+ и O_2^+ являются наиболее распространёнными, тогда как O^+ и N_2^+ имеют вторичное содержание. Электронная концентрация слоя E больше, чем слоя D, и составляет порядка 10^{11} м^{-3} . Ночью ионизация значительно уменьшается из-за рекомбинации до примерно $5 \times 10^9 \text{ м}^{-3}$. Иногда на высотах 100-120 км можно обнаружить плотный участок ионизации. Этот область называется спорадическим слоем E и обозначается, как Es. Образование слоя Es никак не связано с образованием стандартного слоя E и не следует какой-либо преодлической структуре.

Слой F1 находится на высотах примерно 140-210 км над поверхностью Земли. Ионизация в этой области обусловлена EUV излучением с $\lambda = 10 \div 91,1 \text{ нм}$. Как и в слое E, здесь преобладают ионы O_2^+ и NO^+ и вторично распространены O^+ и N_2^+ . Электронная концентрация в слое F1 больше, чем в слоях D и E, и в зависимости от солнечной активности составляет порядка $10^{11} \div 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Ночью ионизация в этой области исчезает не полностью. Вместо этого слой F1 объединяется со слоем F2

и образует единую область – слой F. Слой F2 простирается на высотах примерно 210-600 км над поверхностью Земли. Здесь доминирует ионы O^+ . Слой F2 имеет самую высокую электронную концентрацию, которая достигает примерно $8 \times 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Помимо этого, он остаётся сильно ионизованным в ночное время из-за транспортных эффектов, которые вызывают нисходящий вертикальный дрейф ионизации от протоносферы.

Значительно выше максимума слоя F2 (на высотах более 700 км) количество ионов O^+ начинает уменьшаться. На их место приходят ионы H^+ и He^+ , причём H^+ являются более распространёнными. Ионы H^+ представляют собой просто свободные протоны, поэтому эта область называется протоносферой. Электронная концентрация в этой области ниже, чем в слое F2, и составляет около 10^{10} м^{-3} . Протосфера и слой F2 постоянно обмениваются ионами посредством реакции:



В течение дня восходящий диффузионный поток вызывает прямую реакцию, при которой ионизация передаётся из слоя F2 в протоносферу. Ночью имеет место обратная реакция, т.е. нисходящий диффузионный поток обеспечивает слой F2 ионизацией из протоносферы.

Электромагнитные волны, проходящие через ионосферу, подвержены ряду эффектов, многие из которых возникают непосредственно из-за взаимодействия со свободными электронами. Эти эффекты зависят не только от частоты сигнала, но и от полного электронного содержания (Total Electron Content, TEC):

$$TEC = \int_S N_e(s) ds \quad (2.8)$$

где $N_e(s)$ – функция концентрации свободных электронов. ТЕС является пространственно-временным параметром, зависящим от состояния ионосферы на пути сигнала между спутником и приёмником и обычно измеряется в TECU (Total Electron Content Units), где $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$. Прил. 1 резюмирует наиболее важные эффекты, которые оказывает ионосфера на распространение радиоволн различных частот [18]. Условия, при которых эта таблица была получена, соответствуют наихудшему случаю для распространения волн в невозмущённой ионосфере, т.е. дневным часам в период высокой солнечной активности. Можно заметить, что для рабочих частот GPS значимыми эффектами являются групповая задержка сигнала и фарадеевское вращение. Все остальные эффекты являются несущественными и в большинстве случаев ими можно пренебречь.

2.2 КОМБИНИРОВАНИЕ МНОГОЧАСТОТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Одночастотный приёмник GPS выполняет измерения только на одной частоте (например, L1) псевдодальности R_1 , фазы несущей Φ_1 и доплеровского сдвига D_1 . Двухчастотный приёмник, соответственно, способен выполнять измерения на двух частотах, т.е. помимо ранее упомянутых измерений на L1, ещё есть измерения на L2 (R_2 , Φ_2 и D_2). Наконец, трёхчастотный приёмник может принимать сигналы на всех трёх частотах – L1, L2 и L5. Следовательно, в дополнение к шести ранее упомянутым измерениям, ещё есть R_5 , Φ_5 и D_5 . Комбинирование многочастотных измерений представляет собой линейные комбинации двух или более измерений на разных частотах. Это обеспечивает некоторые преимущества при выполнении позиционирования, такие как устранение эффектов определённых источников ошибок или помощь в обнаружении срыва фазы. Обычно комбинируют только измерения одного типа, т.е. код-код, фаза-фаза или Доплер-Доплер, но иногда используют и другие, например, код-фаза.

Моделирование ионосферы при помощи параметров, передаваемых в навигационном сообщении, способно устраниить только около половины ионосферной ошибки. Это обычно достаточно для стандартного позиционирования, но не для прецизионного. Поэтому для практически полного устранения ошибки из-за задержки сигнала в ионосфере используется так называемая безионосферная линейная комбинация (Ionosphere-Free Linear Combination, IFLC).

Ионосфера является дисперсионной средой. Соответственно, сигналы разных частот распространяются с разными скоростями. Это означает, что величина временной задержки и, следовательно, ионосферная ошибка отличается между измерениями на разных частотах. Рассмотрим измерения псевдодальности (1.5) на L1 и L2:

$$\begin{aligned} R_1 &= \rho + c\delta_r + I_1 \\ R_2 &= \rho + c\delta_r + I_2 \end{aligned} \tag{2.9}$$

где I_1 и I_2 – ионосферные ошибки на L1 и L2. Остальными источниками ошибок пока можно пренебречь, т.к. они не имеют отношения к ионосфере. Ионосферная ошибка зависит от частоты сигнала и в первом приближении может быть аппроксимирована как:

$$I = \frac{40,3}{f^2} \text{ТЕС} \tag{2.10}$$

Таким образом, выражения (2.9) можно переписать в следующем виде:

$$\begin{aligned} R_1 &= \rho + c\delta_r + \frac{40,3}{f_1^2} \text{TEC} \\ R_2 &= \rho + c\delta_r + \frac{40,3}{f_2^2} \text{TEC} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Умножение обеих сторон этих выражений на квадраты соответствующих частот даёт:

$$\begin{aligned} f_1^2 R_1 &= f_1^2 (\rho + c\delta_r) + 40,3 \text{TEC} \\ f_2^2 R_2 &= f_2^2 (\rho + c\delta_r) + 40,3 \text{TEC} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Если теперь вычесть второе выражение из первого, то получим:

$$f_1^2 R_1 - f_2^2 R_2 = (f_1^2 - f_2^2)(\rho + c\delta_r) \quad (2.13)$$

Таким образом, стандартная форма записи IFLC на основе измерений псевдодальностей выглядит как:

$$R_{IF} = \rho + c\delta_r = \frac{f_1^2 R_1 - f_2^2 R_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.14)$$

IFLC также может быть получена при помощи фазовых измерений сигнала. Рассмотрим измерения фазы несущей (1.10) на L1 и L2:

$$\begin{aligned} \lambda_1 \Phi_1 &= \rho + c\delta_r + \lambda_1 N_1 - I_1 \\ \lambda_2 \Phi_2 &= \rho + c\delta_r + \lambda_2 N_2 - I_2 \end{aligned} \quad (2.15)$$

Здесь также все остальные источники ошибок пренебрежены. Стоит обратить внимание, что вклад ионосферной ошибки имеет другой знак. Это связано с таким явлением, как дивергенция кодовых и фазовых измерений, которая в свою очередь обусловлена дисперсией. Разделив обе части выражений (2.15) на соответствующие длины волн и, учитывая, что $c = f\lambda$, получим:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \frac{f_1}{c} \rho + f_1 \delta_r + N_1 - \frac{f_1}{c} I_1 \\ \Phi_2 &= \frac{f_2}{c} \rho + f_2 \delta_r + N_2 - \frac{f_2}{c} I_2 \end{aligned} \quad (2.16)$$

Подставив выражение (2.10), получим:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \frac{f_1}{c} \rho + f_1 \delta_r + N_1 - \frac{40,3}{cf_1} \text{TEC} \\ \Phi_2 &= \frac{f_2}{c} \rho + f_2 \delta_r + N_2 - \frac{40,3}{cf_2} \text{TEC} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Умножение обеих сторон на соответствующие частоты устраниет частотную зависимость члена ионосферной ошибки:

$$\begin{aligned} f_1\Phi_1 &= \frac{f_1^2}{c}\rho + f_1^2\delta_r + f_1N_1 - \frac{40,3}{c}\text{ТЕС} \\ f_2\Phi_2 &= \frac{f_2^2}{c}\rho + f_2^2\delta_r + f_2N_2 - \frac{40,3}{c}\text{ТЕС} \end{aligned} \quad (2.18)$$

Вычитание второго выражения из первого даёт:

$$f_1\Phi_1 - f_2\Phi_2 = (f_1^2 - f_2^2) \left(\frac{\rho}{c} + \delta_r \right) + f_1N_1 - f_2N_2 \quad (2.19)$$

Учитывая, что $c = f\lambda$, то умножив обе части последнего выражения на c и поделив на $f_1^2 - f_2^2$ получим:

$$\frac{f_1^2\lambda_1\Phi_1 - f_2^2\lambda_2\Phi_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + c\delta_r + \frac{f_1^2\lambda_1N_1 - f_2^2\lambda_2N_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.20)$$

Таким образом, стандартная форма записи IFLC на основе измерений фазы несущей определяется как:

$$\Phi_{IF} = \frac{f_1^2\lambda_1\Phi_1 - f_2^2\lambda_2\Phi_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.21)$$

Из-за нескольких приближений, использующихся при выводе формулы (2.10), IFLC всё же не полностью устраняет ионосферную ошибку. С более точной аппроксимацией, которая учитывает ошибки высших порядков, благодаря последовательному приближению показателя преломления, можно ознакомится в [14].

2.3 РАЗНОСТНЫЕ МЕТОДЫ

Относительное позиционирование, также известное как дифференциальное позиционирование, представляет собой совокупность методов, в который измерения от двух или более приёмников и/или спутников вычтываются. Подобно комбинированию многочастотных измерений, разностные методы полезны для устранения и минимизации определённых источников ошибок, в том числе ионосферных. Существует три различных типа дифференциального позиционирования: с использованием одинарных, двойных и тройных разностей. Одинарные разности выполняются в одну эпоху измерений для двух спутников и одного приёмника, либо для одного спутника и двух приёмников. В случае, когда используется два приёмника, расстояние между ними называется *базовой линией (baseline)*. Для коротких базовых линий (до нескольких километров) ионосферные,

тропосферные и эфемеридные ошибки пренебрежимо малы и могут игнорироваться [6]. Эти ошибки будут расти вместе с увеличением базовой линии, поэтому относительное позиционирование наиболее эффективно для станций, находящихся в непосредственной близости друг от друга. Двойные разности могут быть сформированы путём вычитания двух отдельных одинарных разностей, т.е. для них необходимо два спутника и два приёмника. Тройная разность – это двойная разность, которая вычитается из той же двойной разности, но в другую эпоху измерений. Таким образом, для формирования тройной разности все ещё необходимо два спутника и два приёмника, но измерения должны выполняться в последовательные эпохи. Обозначим через индекс $s = j, k, \dots$ номера спутников, а через индекс $r = A, B, \dots$ номера приёмников. В таком случае, схема относительного позиционирования соответствует рис. 4.

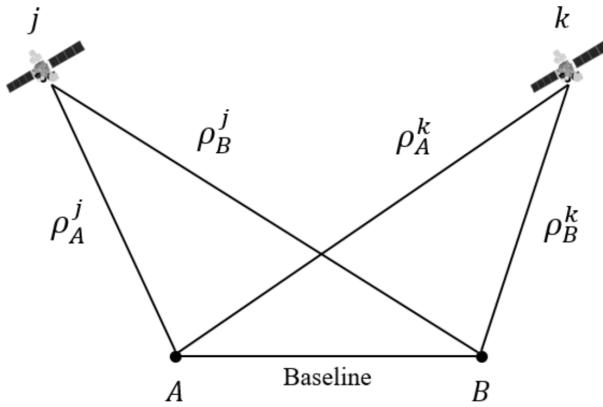


Рис. 4. Относительное позиционирования с использованием двух спутников и двух приёмников [6].

Одинарные разности

Относительное позиционирование можно выполнять, используя как измерения псевдодальности, так и фазы несущей. Рассмотрим принцип формирования одинарных разностей на примере измерений фазы несущей. Для последующих выкладок введём инструментальные погрешности приёмника $d_{p,r}$ и спутника d_p^s , чтобы показать, как они будут устраниться при использовании разностных методов. Все остальные источники ошибок сгруппируем в одно слагаемое e_r^s . Существуют два разных типа одинарных разностей: между приёмниками и между спутниками.

Для начала рассмотрим одинарную разность между приёмниками, т.е. разность с использованием одного спутника j и двух приёмников A и B . В таком случае, выражения для измерений фазы несущей (1.10)

выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned}\Phi_A^j &= \frac{1}{\lambda} \left[\rho_A^j + c(\delta_A - \delta^j) + \lambda N_A^j + d_{p,A} - d_p^j + e_A^j \right] \\ \Phi_B^j &= \frac{1}{\lambda} \left[\rho_B^j + c(\delta_B - \delta^j) + \lambda N_B^j + d_{p,B} - d_p^j + e_B^j \right]\end{aligned}\quad (2.22)$$

Вычтя первое выражение из второго и введя обозначение $X_{AB} = X_B - X_A$, получим:

$$\Phi_{AB}^j = \frac{1}{\lambda} \left[\rho_{AB}^j + c\delta_{AB} + \lambda N_{AB}^j + d_{p,AB} + e_{AB}^j \right] \quad (2.23)$$

Стоит обратить внимание, что слагаемые, относящиеся к инструментальным ошибкам d_p^j и ошибке часов спутника δ^j , исключены.

Теперь рассмотрим одинарную разность между спутниками, т.е. разность с использованием одного приёмника A и двух спутников j и k . В этом случае, выражения для измерений фазы несущей (1.10) выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned}\Phi_A^j &= \frac{1}{\lambda} \left[\rho_A^j + c(\delta_A - \delta^j) + \lambda N_A^j + d_{p,A} - d_p^j + e_A^j \right] \\ \Phi_A^k &= \frac{1}{\lambda} \left[\rho_A^k + c(\delta_A - \delta^k) + \lambda N_A^k + d_{p,A} - d_p^k + e_A^k \right]\end{aligned}\quad (2.24)$$

По аналогии, вычтя первое выражение из второго и введя обозначение $X^{jk} = X^k - X^j$, получим:

$$\Phi_A^{jk} = \frac{1}{\lambda} \left[\rho_A^{jk} - c\delta^{jk} + \lambda N_A^{jk} - d_p^{jk} + e_A^{jk} \right] \quad (2.25)$$

В этом случае были устраниены аппаратные ошибки $d_{p,A}$ и ошибки часов δ_A приёмника.

Двойные разности

Двойные разности формируются простым вычитанием двух одинарных разностей одного типа. Сформируем одинарную разность наподобие (2.23), но только для спутника k , а затем вычтем из нее (2.23). Введя обозначение $X_{AB}^{jk} = X_{AB}^k - X_{AB}^j$, получим:

$$\Phi_{AB}^{jk} = \frac{1}{\lambda} \left[\rho_{AB}^{jk} + \lambda N_{AB}^{jk} + e_{AB}^{jk} \right] \quad (2.26)$$

Стоит обратить внимание, что оставшиеся ошибки, связанные с приёмником, полностью исчезли. Если проделать подобную операцию, но уже с выражением (2.25), то полностью исчезнут все ошибки, связанные со спутником.

Тройные разности

Тройные разности могут быть сформированы пачём вычитания двойных разностей в различные эпохи измерений. Например, рассмотрим двойные разности (2.26), сформированные в две эпохи t_1 и t_2 :

$$\begin{aligned}\Phi_{AB}^{jk}(t_1) &= \frac{1}{\lambda} \left[\rho_{AB}^{jk}(t_1) + \lambda N_{AB}^{jk} + e_{AB}^{jk}(t_1) \right] \\ \Phi_{AB}^{jk}(t_2) &= \frac{1}{\lambda} \left[\rho_{AB}^{jk}(t_2) + \lambda N_{AB}^{jk} + e_{AB}^{jk}(t_2) \right]\end{aligned}\quad (2.27)$$

Вычтя первое выражение из второго и введя обозначение $X_{AB}^{jk}(t_{12}) = X_{AB}^{jk}(t_2) - X_{AB}^{jk}(t_1)$, получим:

$$\Phi_{AB}^{jk}(t_{12}) = \frac{1}{\lambda} \left[\rho_{AB}^{jk}(t_{12}) + e_{AB}^{jk}(t_{12}) \right] \quad (2.28)$$

Как видно, тройные разности полностью устраниют фазовую неопределённость.

2.4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ

Согласно выражению (2.10), помимо частоты сигнала ионосферная ошибка напрямую зависит от ТЕС. На рабочих частотах GPS значимыми эффектами, обусловленными ТЕС, являются фарадеевское вращение и групповая задержка сигнала. Проблема первого из них легко решается при помощи использования правой круговой поляризации. Как итог, групповая задержка остаётся единственным основным источником ионосферной ошибки. Ещё одним методом её коррекции является применение ионосферных моделей. В настоящее время существует несколько широко используемых моделей ионосферы, в частности модели Клобучара и NeQuick. Т.к. ионосфера очень динамична, то некоторые её эффекты могут быть смоделированы только статистически. Таким образом, невозможно создать детерминированную модель для идеального прогнозирования и полного устранения ионосферной ошибки. Более сложные модели способны лучше минимизировать ионосферную ошибку, но платой за это является необходимость высокой вычислительной мощности для обработки больших объёмов данных.

В качестве примера более подробно рассмотрим модель Клобучара. Эта модель первоначально была опубликована в 1987 году в работе [19] и разрабатывалась, прежде всего, для одночастотных приёмников в средних широтах. Установлено, что ТЕС обычно имеет стандартное отклонение около 20-25% от среднемесячного значения, а его суточный максимум приходится примерно на 14 часов по местному времени. Модель Клобучара разработана на основе соответствия дневному среднемесячному значению ТЕС. Поэтому любое отклонение от этого

значения не может быть учтено моделью и должно расцениваться одночастотным навигационным приёмником, как ошибка. Суточное изменение среднего ТЕС хорошо аппроксимируется частью функции косинуса. Для определения её формы используются четыре параметра: постоянная составляющая, амплитуда, период и начальная фаза. Модель Клобучара использует групповую задержку сигнала, рассчитанную по этому ТЕС, которая принимается постоянной и равной 5 нс для сигнала L1. Во время суточного максимума вариации ТЕС малы, поэтому начальная фаза косинуса, как упоминалось ранее, принимается равной 14 часам по местному времени. Остальные два параметра (амплитуда и период) непостоянны и по-хорошему должны рассматриваться, как функции геомагнитной широты. Они представлены полиномами третьей степени (α_n и β_n для $n = 0, 1, 2, 3$), чьи коэффициенты предаются в навигационном сообщении. Стоит отметить, что если использовать полиномы четвёртой степени и выше, то можно достичь более точной аппроксимации как амплитуды, так и периода. Однако это приведёт к более долгой передаче навигационного сообщения, что, на самом деле, нежелательно. Поскольку ТЕС изменяется в зависимости от сезона и цикла солнечной активности, то коэффициенты α_n и β_n также не постоянны во времени, поэтому должны переодически обновляться. MCS обновляет навигационное сообщение новыми коэффициентами не реже одного раза в десять дней.

Для упрощения расчётов алгоритм Клобучара в качестве своей основы использует однослойную модель ионосферы. Геометрия однослойной модели ионосферы изображена на рис. 5. Согласно этой модели, все свободные электроны ионосферы сконцентрированы в бесконечно тонком сферическом слое на высоте h_I , которая обычно принимается равной от 300 до 400 км. Распространяющийся сигнал пересекает этот слой в некоторой точке, которая называется ионосферной точкой (Ionospheric Piercing Point, IPP). Зенитный угол χ' для IPP задаётся уравнением:

$$\chi' = \arcsin \left(\frac{a}{a + h_I} \sin \chi \right) \quad (2.29)$$

где $a = 6378$ км – радиус Земли; χ – зенитный угол для приёмника, который можно рассчитать, используя известное положение спутника T_x (по эфемеридам из навигационного сообщения) и приблизительные координаты приёмника R_x .

В связи с тем, что почти все сигналы GPS распространяются под наклоном к приёмнику, то следует использовать не вертикальный ТЕС (Vertical TEC, VTEC), а наклонный ТЕС (Slant TEC, STEC), которые связаны между собой соотношением:

$$STEC = F \times VTEC \quad (2.30)$$

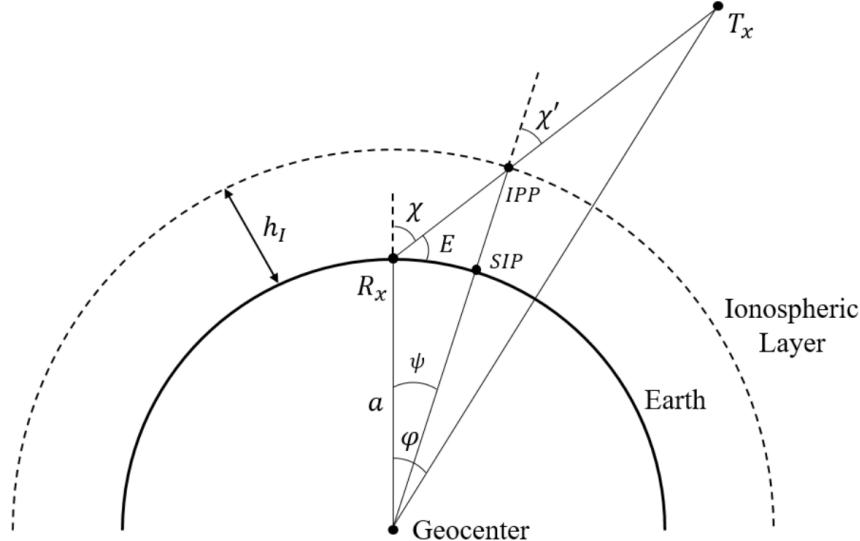


Рис. 5. Геометрия однослоиной модели ионосферы [9].

где $F = \sec \chi'$ – наклонный коэффициент. STEC можно получить на основе двухчастотных кодовых (1.4) или фазовых (1.10) измерений сигналов GPS [9]:

$$\begin{aligned} \text{STEC} &= \frac{1}{40,38} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (R_1 - R_2) \\ &= \frac{1}{40,38} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(\lambda_1 \Phi_1 - \lambda_2 \Phi_2) - (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2)] \end{aligned} \quad (2.31)$$

В модели Клобучара средняя высота ионосферы h_I принимается равной 350 км, а F выражается через угол места $E = 90 - \chi$. Поэтому F можно переписать как:

$$F = \sec [\arcsin(0, 95 \cos E)] \quad (2.32)$$

Выполнение тригонометрических операций требует больших вычислительных затрат, чем для арифметических. Поэтому для повышения скорости алгоритма Клобучара, наклонный коэффициент F аппроксимируется следующим образом:

$$F \approx 1 + 2 \left(\frac{95 - E}{90} \right)^3 \quad (2.33)$$

Такое приближение даёт погрешность наклонного коэффициента F в пределах 2% для всех углов места больше 5° .

Другой величиной, используемой в алгоритме Клобучара, является геоцентрический угол ψ между приёмником и IPP. ψ можно выразить, как функцию угла места E . Для этого на рис. 5 рассмотрим треугольник с вершинами в геоцентре, R_x и IPP. Сумма углов любого треугольника равна 180° :

$$90 + E + \chi' + \psi = 180 \quad (2.34)$$

С учётом выражения (2.29) получается:

$$\psi = 90 - E - \arcsin \left(\frac{a}{a + h_I} \sin \chi \right) \quad (2.35)$$

И наконец, аппроксимируя тригонометрические функции, приходим к:

$$\psi \approx \frac{445}{E + 20} - 4 \quad (2.36)$$

Такое приближение даёт погрешность геоцентрического угла ψ в пределах $0,2^\circ$ для всех углов места больше 10° и $0,5^\circ$ для всех углов места меньше 10° .

Приёмники GPS обычно имеют некоторую оценку своих текущих геодезических координат: широты ϕ_u и долготы λ_u . Однако в однослоиной модели ионосферы групповая задержка сигнала измеряется в ионосферной точке, геодезические координаты которой для наклонных трасс распространения будут другими. Вертикальная проекция IPP на поверхность Земли называется подионосферной точкой (Sub-Ionospheric Point, SIP). Широта ϕ_I и долгота λ_I подионосферной точки могут быть выражены следующим образом:

$$\begin{aligned} \phi_I &= \arcsin(\sin \phi_u \cos \psi + \cos \phi_u \sin \psi \cos A) \\ \lambda_I &= \lambda_u + \arcsin \left(\frac{\sin \psi \sin A}{\cos \phi_I} \right) \end{aligned} \quad (2.37)$$

где A – азимутальный угол, измеренный относительно географического северного полюса. На коротких расстояниях кривизна Земли незначительна, поэтому целесообразно использовать приближение плоской Земли, которое упрощает выражения выше:

$$\begin{aligned} \phi_I &\approx \phi_u + \psi \cos A \\ \lambda_I &\approx \lambda_u + \frac{\psi \sin A}{\cos \phi_I} \end{aligned} \quad (2.38)$$

Такие приближения удовлетворительны для всех широт меньше 75° . В алгоритме Клобучара широты, которые больше 75° , просто определяются равными 75° , чтобы избежать больших ошибок.

ТЕС и, следовательно, групповая задержка сигнала, строго говоря, зависят не от географической широты, а от геомагнитной. Поэтому алгоритм Клобучара включает в себя преобразование геодезической широты в геомагнитную:

$$\sin \phi_m = \sin \phi \sin \phi_p + \cos \phi \cos \phi_p \cos(\lambda - \lambda_p) \quad (2.39)$$

где ϕ_m – геомагнитная широта; ϕ и λ – геодезические координаты, которые необходимо преобразовать; ϕ_p и λ_p – геодезические координаты

северного геомагнитного полюса Земли. В модели Клобучара $\phi_p = 78,3^\circ$ и $\lambda_p = 291^\circ$. Поэтому приближение ϕ_m в градусах имеет следующий вид:

$$\phi_m = \phi + 11,6 \cos(\lambda - 291) \quad (2.40)$$

Такое приближение даёт погрешность геомагнитной широты ϕ_m в пределах 1° для всех широт меньше 40° и 2° для широт меньше 65° . Следует отметить, что геомагнитный северный полюс Земли со временем мигрирует, поэтому его текущие координаты больше не совпадают с теми, которые используются в модели Клобучара. Согласно модели IGRF-12 [20] в 2017 году координаты северного геомагнитного полюса составляли $\phi_p = 80,4^\circ$ и $\lambda_p = 287,2^\circ$. Однако влияние этого эффекта на расчёт геомагнитной широты незначительно и вносит погрешность в уравнение (2.40) не более $2,1^\circ$.

При своих вычислениях алгоритм Клобучара использует местное время в SIP, которое может быть найдено в единицах часов на основе геодезической долготы и всемирного координатного времени UTC:

$$t = \frac{\lambda_I}{15} + t_{UTC} \quad (2.41)$$

где t_{UTC} – всемирное координатное время в единицах часов.

Резюмируя написанное выше, можно преступить к непосредственному описанию работы алгоритма Клобучара. Модель Клобучара для вертикальной групповой ионосферной задержки сигнала I_V математически записывается как:

$$I_V = DC + A \cos\left(\frac{2\pi(t - t_0)}{P}\right) \quad (2.42)$$

где $DC = 5$ нс – постоянная (ночная) составляющая вертикальной групповой ионосферной задержки для сигнала L1; A , P и $t_0 = 14$ часов – амплитуда, период и начальная фаза (без учёта 2π) дневной функции косинуса. Аналогично выражению (2.30), наклонная групповая ионосферная задержка сигнала будет равна:

$$I = F \times I_V \quad (2.43)$$

Приёмник GPS имеет следующие входные параметры: собственные приблизительные геодезические координаты ϕ_u и λ_u , азимутальный угол A и восемь коэффициентов модели Клобучара α_n и β_n ($n = 0, 1, 2, 3$). Стоит отметить, что при всех дальнейших выкладках углы полагаются безразмерными и кратными 180° , т.е. измеряются в полукругах, а время – в секундах. Алгоритм Клобучара включает в себя следующие шаги:

1. Согласно (2.36), вычисляется угол между приёмником и IPP:

$$\psi = \frac{0,0137}{E + 0,11} - 0,022 \quad (2.44)$$

2. Согласно (2.38), вычисляются широта и долгота SIP:

$$\begin{aligned} \phi_I &= \begin{cases} 0,416, & \phi_I > 0,416 \\ \phi_u + \psi \cos A, & 0,416 \leq \phi_I \leq 0,416 \\ -0,416, & \phi_I < 0,416 \end{cases} \\ \lambda_I &= \lambda_u + \frac{\psi \sin A}{\cos \phi_I} \end{aligned} \quad (2.45)$$

3. Согласно (2.40), вычисляется геомагнитная широта SIP:

$$\phi_m = \phi_I + 0,064 \cos(\lambda_I - 1,617) \quad (2.46)$$

4. Согласно (2.41), вычисляется местное время в SIP:

$$t = \begin{cases} 43200\lambda_I + t_{UTC} + 86400, & t < 0 \\ 43200\lambda_I + t_{UTC}, & 0 \leq t \leq 86400 \\ 43200\lambda_I + t_{UTC} - 86400, & t > 86400 \end{cases} \quad (2.47)$$

5. На основе коэффициентов α_n и β_n вычисляются амплитуда, период и фаза дневной функции косинуса (2.42):

$$\begin{aligned} A &= \begin{cases} \sum_{n=0}^3 \alpha_n \phi_m^n, & A \geq 0 \\ 0, & A < 0 \end{cases} \\ P &= \begin{cases} \sum_{n=0}^3 \beta_n \phi_m^n, & P \geq 72000 \\ 72000, & P < 0 \end{cases} \quad (2.48) \\ X &= \frac{2\pi(t - 50400)}{P} \end{aligned}$$

6. Согласно (2.33), вычисляется наклонный коэффициент:

$$F = 1 + 16(0,53 - E)^3 \quad (2.49)$$

7. Согласно (2.43), приближённо вычисляется наклонная групповая ионосферная задержка сигнала:

$$I = \begin{cases} F \left[5 \times 10^{-9} + \sum_{n=0}^3 \alpha_n \phi_m^n \left(1 - \frac{X^2}{2} + \frac{X^4}{24} \right) \right], & |X| \leq 1,57 \\ 5 \times 10^{-9}, & |X| > 1,57 \end{cases}$$

Стоит ещё раз упомянуть, что полученная ионосферная задержка соответствует только сигналу L1. Однако с её помощью можно довольно просто получить задержки, которые испытывают сигналы на других частотах:

$$I_f = \left(\frac{f_{L1}}{f} \right)^2 I_{L1} \quad (2.50)$$

Как итог, модель Клобучара способна устраниТЬ ионосферную ошибку примерно на 50%.

ГЛАВА 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ GPS В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ВОЗМУЩЁННОСТИ

За последние несколько десятков лет было много работ, посвящённых влиянию геомагнитных бурь на точность позиционирование GPS. В настоящее время наиболее популярным методом относительного позиционирования является Real-Time Kinematic (RTK) метод. Как правило, для базовых линий порядка 100 км RTK может достичь точности примерно на сантиметровом уровне [21]. Однако геомагнитные бури оказывают существенное влияние на это [22]. Из-за быстрой декорреляции ионосферной ошибки во время сильной бури 29 октября 2003 года процент успешной разрешимости мгновенной неоднозначности RTK снизился с 94% (спокойный день) до 31%. В результате, для базовой линии равной 121 км ошибка позиционирования по вертикали превысила 0,5 м. Подобные результаты работы [23] также указывают, что в регионе Европы в период геомагнитной бури 30 октября 2003 года точность позиционирования GPS в кинематическом режиме достигла 12,8 см, 8,1 см и 26,1 см для горизонтальных и вертикальной компонент, соответственно, в то время как при спокойных ионосферных условиях было не более 2,5 см. За исключением самих ионосферных возмущений, на точность позиционирования RTK также влияет ориентация базовой линии во время бури. Максимальные и стандартные отклонения значений ошибок позиционирования для базовых линий с ориентацией север-юг больше, чем для базовых линий с ориентацией запад-восток [24]. В более новой работе [25], сфокусированной уже на регионе Норвегии, представлен подробный анализ эффективности сети RTK и фазовых мерцаний во время сильной геомагнитной бури в День святого Патрика (17 марта) 2015 года.

Другим популярным методом позиционирование является PPP метод, исследование которого при геомагнитных бурях получило лишь ограниченное внимание. Как упоминалось ранее, PPP – это метод абсолютного позиционирования, который позволяет достичь точности на сантиметровом уровне при использовании двухчастотных измерений в комбинации с точными эфемеридами спутников [2, 26]. В работе [25] также было показано, что при одних и тех же условиях возмущения ионосферы точность PPP лучше, чем у RTK. Однако там были рассмотрены только три станции в пределах 55-70°N. Чтобы получить более репрезентативные результаты, авторы работы [27] изучили несколько сильных геомагнитных бурь по данным примерно 500 станций

IGS в период 24-го цикла солнечной активности, включая бурю 17 марта 2015 года. Их результаты указывают на увеличение ошибки позиционирования (PPP) до 0,32 м на средних широтах и более 1 м на высоких широтах, относительно 0,163 м в спокойный день.

В данной же работе используются общедоступные данные как международной (IGS), так и региональных сетей ГНСС. Таким образом, по общей совокупности задействованы порядка 4500 приёмных станций, расположенных по всему миру. Основной задачей является комплексный анализ точности позиционирования GPS в различных широтно-долготных регионах при использовании PPP в двухчастотном кинематическом режиме во время нескольких сильных гелиогеофизических явлений (солнечных вспышек [28] и геомагнитных бурь) в период 24-го цикла солнечной активности.

3.1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОД ОЦЕНКИ ОШИБКИ PPP

В работе используются двухчастотные измерения GPS примерно 4500 приёмных станций, расположенных по всему миру. Это общедоступные данные, которые предоставляются сетями ГНСС, в список которых входят IGS [3], CHAIN [29], TrigNet, Geoscience Australia, CORS, LPIM, GeoNet, SONEL, UNAVCO и KASI.

Чтобы оценить точность позиционирования, для каждой станции рассчитываются точные координаты (PPP) в кинематическом режиме при помощи программного обеспечения с открытым исходным кодом GAMP [30]. При решении навигационной задачи используется двухчастотная модель PPP, которая основана на недифференцированных и некомбинированных измерениях GPS. Линеризованные уравнения исходных измерений псевдодальности (1.4) и фазы несущей (1.10) имеют вид [30]:

$$\begin{aligned} R_r^s &= \vec{u} \cdot \vec{x} + c(\delta_r - \delta^s) + F \times T_V + \alpha_f I_{L1} + c(d_r - d^s) + e_r^s \\ \lambda \Phi_r^s &= \vec{u} \cdot \vec{x} + c(\delta_r - \delta^s) + F \times T_V - \alpha_f I_{L1} + \lambda(N + b_r - b^s) + e_r^s \end{aligned} \quad (3.1)$$

где \vec{u} – единичный вектор в направлении от приёмника к спутнику; \vec{x} – вектор приращений положения приёмника относительно априорной позиции. Таким образом, в решении учитываются смещения часов приёмника δ_r и спутника δ^s (путём применения точных эфемерид от IGS), вертикальная влажная тропосферная задержка T_V (напомним, что F – наклонный коэффициент, определяемый выражением (2.33)), ионосферная задержка $\alpha_f I_{L1}$ ($\alpha_f = \frac{f_{L1}^2}{f^2}$), а также некалиброванные кодовые (d) и фазовые (b) задержки приёмника и спутника. Помимо этого, заранее моделируется смещение и вариации фазовых центров антенн приёмника и спутника, релятивистские эффекты, эффект

Саньяка, гидростатическая задержка, приливные эффекты и wind-up эффект.

За истинные геоцентрические координаты станции принимаются её медианные значения, полученные из решения за 24 часа измерений без учёта времени сходимости решения. Полная ошибка позиционирования считается, как разница между текущей (x, y, z) и истинной (x_0, y_0, z_0) позицией:

$$\sigma_{xyz} = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \quad (3.2)$$

Чтобы оценить динамику ошибки позиционирования для различных широтно-долготных регионов, рассчитываются среднезональные значения (т.е. ошибка усредняется по ячейкам размером $2,5^\circ$ по широте и долготе) для двух регионов: восточного ($0 \div 180^\circ\text{E}$) и западного ($0 \div 180^\circ\text{W}$) полушарий.

3.2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве примера сначала рассмотрим геомагнитную бурю 25-26 августа 2018 года с индексом G3, которая является одним из самых сильных гелиогеофизических явлений за период 24-го цикла солнечной активности. Причиной этой бури является корональный выброс массы Солнца, произошедший 20 августа 2018 года и достигнувший Земли в течение 5 дней. На рис. 6 изображена динамика индекса DST за август 2018 года, которая была получена при помощи всемирной базы данных геомагнетизма [31]. Значение индекса достигает своего минимума (примерно -180 нТл) 26 августа в 07:15 UT, после чего начинается фаза восстановления бури.



Рис. 6. Динамика индекса DST за август 2018 года.

На рис. 7 (a, b) изображены глобальные распределения вариаций TEC, отфильтрованных в диапазоне периодов 10-20 мин, в 07:45 UT для 25 (до бури) и 26 (главная фаза бури) августа 2018 года, соответственно. Эти вариации были получены при помощи сервиса автоматического сбора и обработки данных ГНСС SIMuRG [32].

Панелям (с, д) соответствуют глобальные распределения полной ошибки позиционирования.

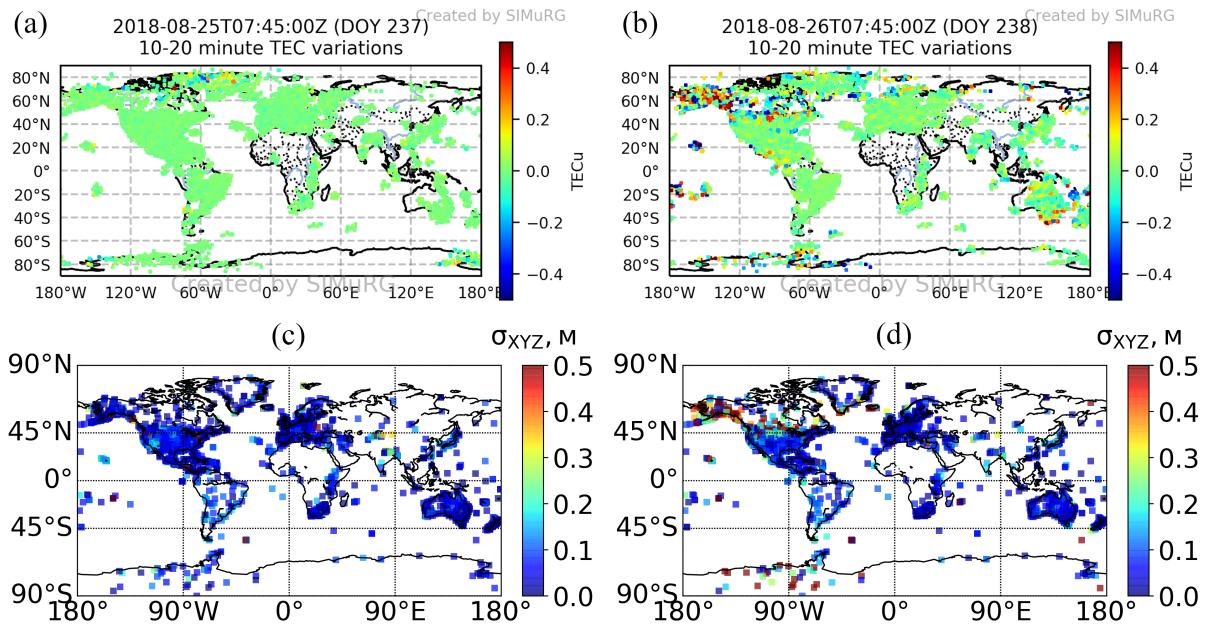


Рис. 7. Глобальные распределения вариаций ТЕС (а, б) и полной ошибки позиционирования (с, д) в 07:45 UT для 25 (а, с) и 26 (б, д) августа 2018 года.

На рис. 7 (б) во время главной фазы бури заметно значительное увеличение вариаций ТЕС в областях, вытянутых вдоль аврорального овала, как в северном, так и в южном полушариях. В североамериканском секторе сильные возмущения достигают вплоть до 40°N. Повышенные значения вариаций ТЕС также наблюдаются в экваториальной области. В этих же регионах на рис. 7 (д) заметно увеличение значений полной ошибки позиционирования, которые не были зарегистрированы в период до бури. Для некоторых приёмных станций величина ошибки превосходит 0,5 м, по сравнению с 0,1 м в спокойный день.

На рис. 8 изображены зависимости усреднённой полной ошибки позиционирования от времени и широты для восточного (а, с) и западного (б, д) полушарий. Панелям (а, б) соответствует 25 августа, а (с, д) – 26 августа. Горизонтальные синие полосы (нулевые значения) указывают на отсутствие данных. Во-первых, следует обратить внимание, что решение PPP, полученное при помощи GAMP, имеет период схождения примерно от 0 до 2 UT. Поэтому это время можно не рассматривать. Согласно результатам на рис. 8 (а, б), в спокойный день характерные значения ошибки в большинстве регионов не превышают 0,1 м. Однако в западном полушарии на широтах 30-60°N значения ошибки больше и достигают примерно 0,3 м. Это увеличение,

скорее всего, связано с особенностью обработки данных, например, из-за геометрии используемых спутников.

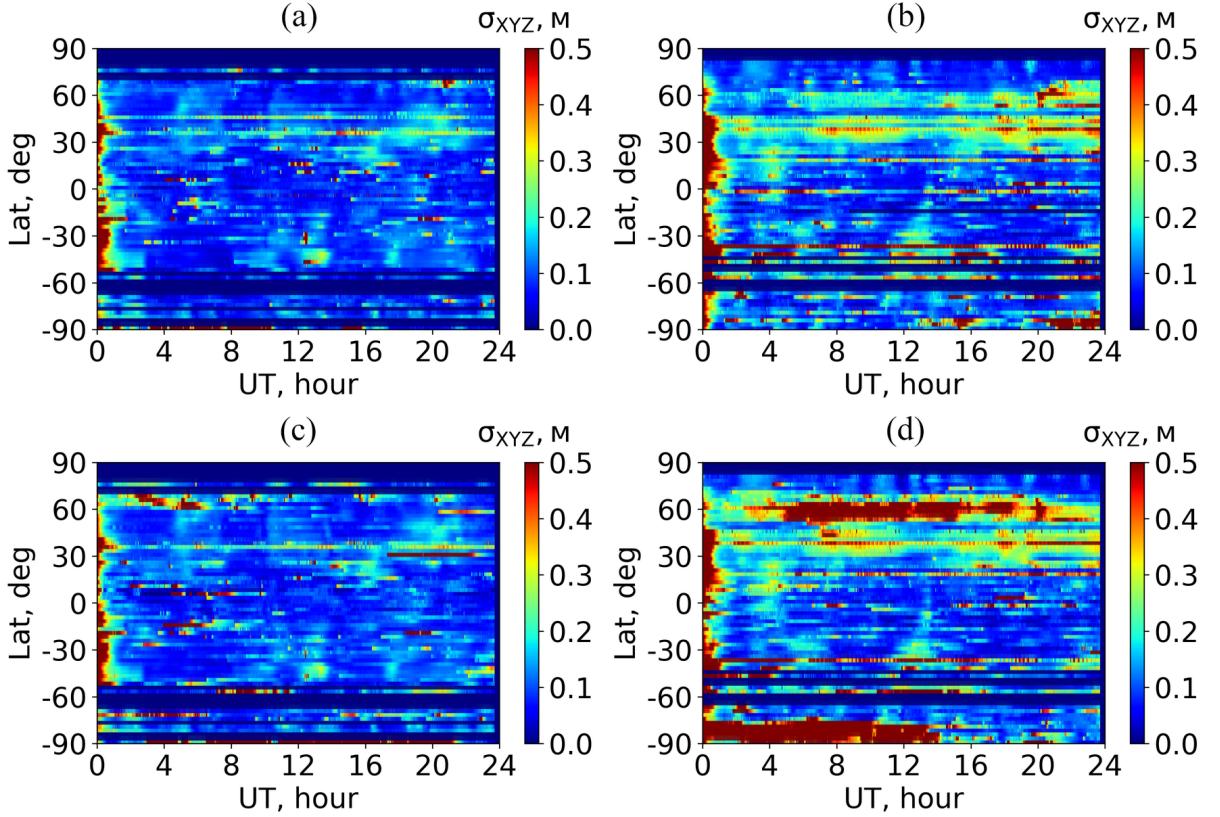


Рис. 8. Зависимости усреднённой полной ошибки позиционирования от времени и широты 25 (а, б) и 26 (с, д) августа 2018 года для восточного (а, с) и западного (б, д) полушарий.

25 августа после 20:00 UT можно заметить небольшое увеличение средней ошибки на широтах 65-75°N как в восточном, так и в западном полушариях. В течение всего дня 26 августа в североамериканском секторе отчётливо наблюдается резкое снижение точности PPP. Значения средней ошибки значительно превышают 0,5 м. Помимо этого, заметный рост ошибки виден на высоких широтах в южном полушарии до примерно 14 UT. В восточном полушарии ухудшение точности позиционирования наблюдается до полудня на широтах 60-70°N.

Следующим рассмотренным гелиогеофизическим событием является магнитная буря 21-23 июня 2015 года с индексом G4. Согласно каталогу [33], источниками этой бури являются несколько корональных выбросов массы из активной области Солнца 12371. На рис. 9 изображена динамика индекса DST за июнь 2015 года. Значения индекса достигают своего минимума (примерно -200 нТл) в начале 23 июня. Однако ионосферные возмущения 22 июня в основном связаны с выбросом типа Halo (1350 км/с), произошедшим в результате вспышки M2.7 с максимумом в 02:34 UT, который стал причиной внезапных магнитных бурь примерно в 05:45 UT и 18:30 UT.

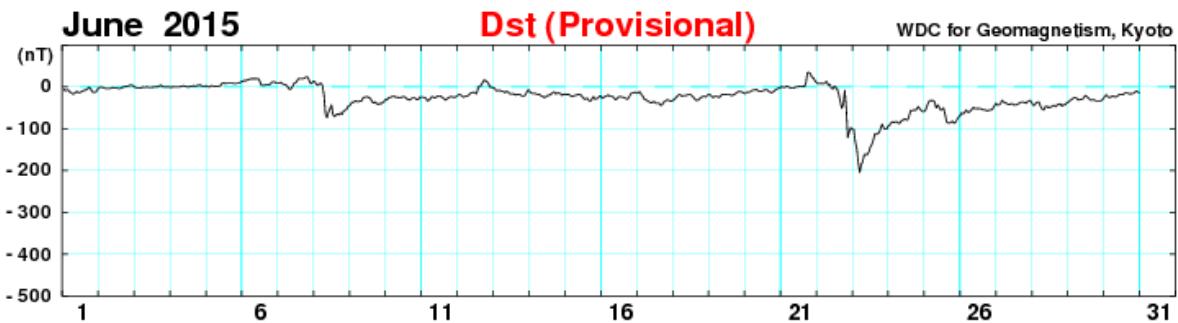


Рис. 9. Динамика индекса DST за июнь 2015 года.

На рис. 10 изображены глобальные распределения вариаций ТЕС (a, b), а также полной ошибки позиционирования (c, d) в 19:00 UT для 21 (a, c) и 22 (b, d) июня 2015 года. Аналогично предыдущему случаю здесь значительное увеличение вариаций ТЕС наблюдается в областях, вытянутых вдоль аврорального овала, как в северном, так и в южном полушариях. Однако можно заметить, что “интенсивность” и долготная протяжённость этих областей гораздо больше, чем для бури 25-26 августа 2018 года. Абсолютные значения вариаций ТЕС достигают более 0,4 ТЕСУ вплоть до азиатского региона. Эти области также хорошо пространственно коррелируют с областями увеличения полной ошибки позиционирования на рис. 10 (d). Стоит отметить, что SIMuRG использует большее количество серверов с данными региональных сетей ГНСС (всего задействовано порядка 6000 приёмных станций [32]). По этой причине эффект в наиболее интересной зоне (североамериканском секторе) на рис. 10 (c, d), к сожалению, ограничен лишь её контуром.

На рис. 11 изображены зависимости усреднённой полной ошибки позиционирования от времени и широты для восточного (a, c) и западного (b, d) полушарий. Панелям (a, b) соответствует 21 июня, а (c, d) – 22 июня. Вертикальной пунктирной линией отмечено время начала внезапной магнитной бури в 18:30 UT. В этом случае характерные значения средней ошибки аналогично составляют менее 0,5 м (даже менее 0,1-0,3 м). 22 июня на рис. 11 (c, d) отчётливо видно резкое ухудшение точности позиционирования после 18:30 UT в северном полушарии на широтах 65-75°N, а также в южном полушарии на широтах 75-90°S. Здесь величина ошибки увеличивается в несколько раз и превышает 0,5 м. Помимо этого, можно заметить экваториальное “распространение” ошибки со временем. В западном полушарии на рис. 11 (d) такое “распространение” наблюдается примерно до 50°N. На этой широте максимум ошибки находится примерно в 20 UT. В восточном же полушарии на рис. 11 (c) наблюдается похожая картина с увеличением ошибки позиционирования после 18:30 UT, но не так ярко из-за меньшего количества станций.

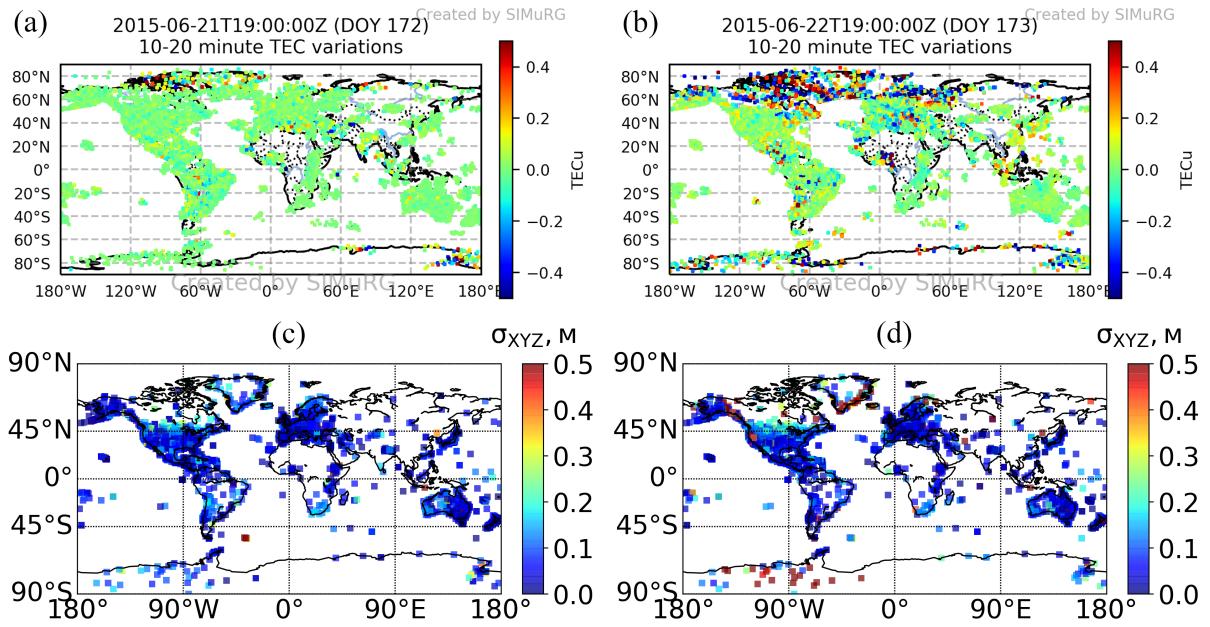


Рис. 10. Глобальные распределения вариаций ТЕС (а, б) и полной ошибки позиционирования (с, д) в 19:00 UT для 21 (а, с) и 22 (б, д) июня 2015 года.

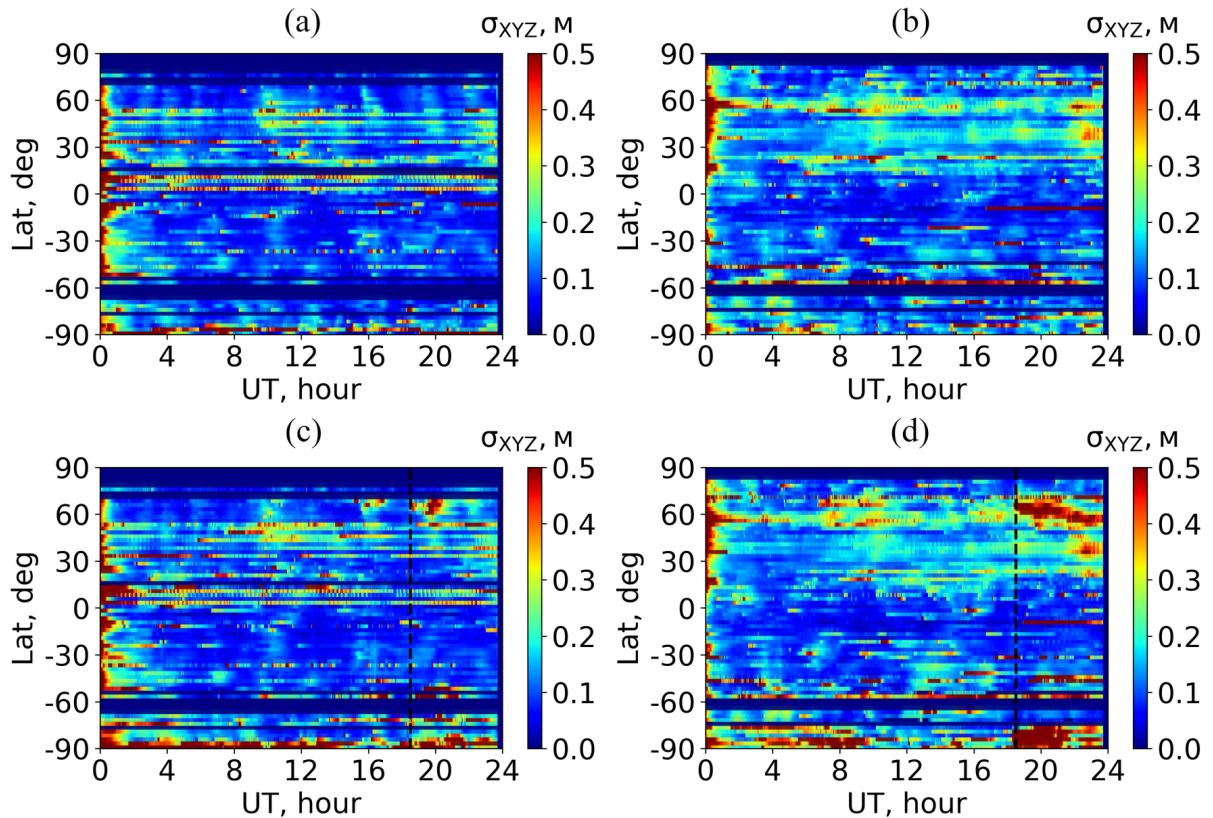


Рис. 11. Зависимости усреднённой полной ошибки позиционирования от времени и широты 21 (а, б) и 22 (с, д) июня 2015 года для восточного (а, с) и западного (б, д) полушарий. Вертикальная пунктирная линия соответствует 18:30 UT.

ГЛАВА 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ GPS В УСЛОВИЯХ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ВОЗМУЩЁННОСТИ

Эксперименты по изменению состояния ионосферы путём её нагрева с помощью высокочастотных (ВЧ) волн ведутся уже довольно давно (примерно с 60-70-х годов прошлого века). Всего в мире для этих целей существовало более 10 экспериментальных установок, но к настоящему времени осталось функционировать только 4: на высоких широтах – HARP (Аляска, США) и EISCAT/Heating (Тромсё, Норвегия); на низких широтах – Arecibo (Аресибо, Пуэрто-Рико); на средних широтах – СУРА (Нижний Новгород, Россия). За это время в ряде работ [34–40], посвящённых исследованию основных механизмов генерации ионосферных возмущений около подобных нагревательных стендов, были идентифицированы ионосферные неоднородности размером от нескольких сантиметров до сотни километров. Также были проведены исследования параметров искусственных перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), но уже вдали (вплоть до 1000 км) от нагревательных стендов СУРА [41, 42] и HARP [43, 44]. А в работе [45] с помощью радиотомографических методов впервые была восстановлена пространственная структура таких ПИВ.

Известно, что наибольший эффект на распространение электромагнитных волн в ионосфере оказывают неоднородности электронной концентрации размера порядка радиуса первой зоны Френеля. Неоднородности такого масштаба являются основной причиной амплитудных мерцаний (быстрых и случайных флюктуаций амплитуды) навигационного сигнала. Неоднородности же большего масштаба приводят к фазовым мерцаниям (соответственно, быстрым и случайным флюктуациям фазы сигнала). Эти эффекты также были зарегистрированы во время экспериментов на стендах HARP [46], EISCAT/Heating [47] и СУРА [48]. Таким образом, подобные искусственные воздействия оказывают влияние на параметры навигационного сигнала и потенциально могут приводить к дополнительной ионосферной задержке [49], следовательно, являясь фактором ухудшения точности позиционирования ГНСС, в частности GPS.

Согласно работе [50], точность позиционирования PPP в двухчастотном кинематическом режиме во время мерцаний снижается в несколько раз и может достигать 1-2 м. Также установлено, что интенсивность искусственных неоднородностей

сравнима с интенсивностью неоднородностей во время сильных гелиогеофизических явлений [51]. Как упоминалось ранее (см. ГЛАВА 3), в настоящее время имеются работы, в которых производилась оценка ошибки позиционирования во время солнечных вспышек [28], а также геомагнитных бурь [22–25, 27]. Однако стоит отметить, что прямой анализ точности позиционирования GPS при искусственной ионосферной возмущённости ни в одной из работ не проводился. Таким образом, основной задачей является комплексный анализ точности позиционирования GPS при использовании PPP в двухчастотном кинематическом режиме во время нескольких рабочих сеансов радиокомплекса СУРА.

4.1 ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА НА СТЕНДЕ СУРА

Нагревательный стенд СУРА ($56,15^{\circ}\text{N}$, $46,1^{\circ}\text{E}$) был создан в 1981 году для проведения прикладных и фундаментальных исследований состояния ионосферы при воздействии на неё ВЧ излучением техногенного характера. Основу стендса составляют три ВЧ радиопередатчика, каждый из которых имеет мощность 250 кВт и работает в диапазоне частот 4-25 МГц, а также антенная решётка размером примерно $300 \times 300 \text{ м}^2$, которая позволяет излучать волны О- и Х- поляризации в диапазоне частот 4,3-9,5 МГц. Эффективная мощность излучения (в случае синхронной работы трёх модулей) и ширина диаграммы направленности составляют 80-240 МВт и $6\text{-}12^{\circ}$, соответственно. Сканирование может выполняться в плоскости геомагнитного меридиана (наклонение геомагнитного поля в районе стендса 71°) в диапазоне $\pm 40^{\circ}$ от вертикали. С более подробным описанием стендса можно ознакомиться в работе [52].

В данной работе рассматриваются экспериментальные сеансы за три дня: 23 августа 2010 года, 19 и 20 сентября 2016 года. Их программа работы представлена в прил. 2. Эксперименты проводились в условиях дневной и вечерней ионосферы (по местному времени). При этом использовались разные режимы работы стендса, начиная с $[+90 \text{ с}, -30 \text{ с}]$ и заканчивая $[+14 \text{ мин}, -16 \text{ мин}]$, где “+” означает длительность волны накачки (ВН), а “-” – длительность паузы. Чтобы обеспечить резонансное взаимодействие с ионосферной плазмой, частота ВН была меньше или порядка критической частоты слоя F2. Помимо этого, сканирование выполнялось в плоскости геомагнитного меридиана под углом 12° (от вертикали) к югу, чтобы усилить генерацию искусственной ионосферной возмущённости за счёт магнитного зенита [35, 48].

Согласно работе [45], для сеансов 23 августа 2016 года максимальные значения вариаций ТЕС (0,5-0,7 ТЕСУ) наблюдались в случае использования волн О-поляризации в вечерние иочные часы. Поэтому

именно это время является наиболее перспективным, где можно ожидать ухудшение точности позиционирования.

Возможность формирования области искусственной ионосферной возмущённости на значительном расстоянии от нагревательного стенда связана с генерацией искусственных или усилением естественных ПИВ. Согласно работам [41, 42, 45], подобные ПИВ наблюдаются преимущественно в вечерние часы при резонансной генерации ВН О-поляризации и модуляции эффективной излучаемой мощности с частотой меньше порядка частоты Брента-Вяйсяля на ионосферных высотах. Поэтому ухудшение точности позиционирования на значительном расстоянии от нагревательного стенда можно ожидать, где период модуляции эффективной излучаемой мощности примерно равен 20 мин и более. Также необходимо учитывать, что в среднеширотной ионосфере амплитуды искусственных ПИВ обычно не превышают характерные амплитуды естественных ПИВ, особенно во время прохождения солнечного терминатора в области зондирования.

Геомагнитная обстановка в рассматриваемые дни была относительно спокойной. 23 августа 2010 года глобальный планетарный индекс геомагнитной активности $K_p = 0,3 \div 3,7$, а индекс глобального симметричного экваториального тока $SYM-H = -1 \div 4$ нТл. 19-20 сентября 2016 года были более возмущенными днями: индекс K_p достигал значения 4,3 (20 сентября 00:03 UT), а индекс $SYM-H$ дважды опускался до -37 нТл (19 сентября 10:30 UT и 20 сентября 02:30 UT).

В работе используются двухчастотные измерения GPS 14 приёмных станций, расположенных на различном расстоянии от нагревательного стенда СУРА. Информация об используемых навигационных приёмниках представлена в прил. 3, где также приведено их расстояние до области нагрева на высоте 250 км ($55,7^\circ\text{N}$, $46,01^\circ\text{E}$). Наиболее близкие приёмники были размещены на самом полигоне (SURA и PREG), а также на удалении до 20 км от него (ZASU и VORO). Остальные 10 приёмников, входящие в сети SmartNet и TatNet, находились на расстоянии от 23 до 1217 км от стенда. Полная схема размещения используемых навигационных приёмников изображена на рис. 12.

В качестве изучаемой величины рассматривается полная ошибка позиционирования, которая вычисляется аналогично выражению (3.2). Помимо этого, в дополнение к двухчастотному кинематическому режиму PPP, реализуемому при помощи программного обеспечения с открытым исходным кодом GAMP [30], используется обычный одночастотный режим (L1C код) с ионосферной коррекцией по модели Клубчара [19].

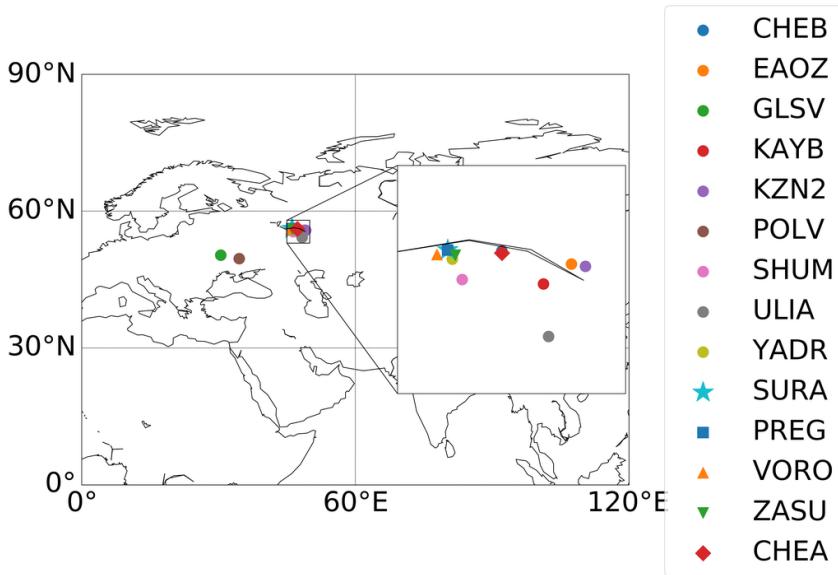


Рис. 12. Геометрия расположения навигационных приёмников, используемых в эксперименте.

4.2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На панелях (а-с) рис. 13 представлены динамики полной ошибки позиционирования в двухчастотном кинематическом режиме PPP для 23 августа 2010 года, 19 и 20 сентября 2016 года, соответственно. Серые вертикальные полосы означают сеансы работы нагревательного стенда СУРА в эти дни. Станции упорядочены по мере удаления от стенда сверху (самая ближняя) вниз (самая удалённая). Помимо этого, для ближайшей к стенду станции добавлены динамики индекса AATR [53] (стандартного отклонения производной ТЕС, нормированной на квадрат наклонного коэффициента) и вариаций ТЕС с окном фильтрации 10-20 мин, которое было выбрано на основе характерных периодов работы стенда (см. прил. 2).

На рис. 13 (а) обрыв данных для станции ZASU обусловлен отключением электричества. В целом видно, что уровень ошибки для ZASU выше, чем для других приёмников. Однако её динамика, как и для других станций, не коррелирует со временем работы стенда, а максимальные значения, наоборот, соответствуют паузе в режиме работы. Так, для промежутка 12:23-13:00 UT полная ошибка позиционирования достигает 0,5 м, в то время как для остальных станций максимальные значения не превосходят 0,25 м. Интересно увеличение ошибки на KZN2 в районе 16:40 UT, чего не наблюдается на более близких станциях. Скорее всего, это просто связано с расходимостью решения PPP. Также на станции ZASU в районе 17:00 UT возникает резкое увеличение ошибки, которое потом довольно быстро уменьшается, несмотря на наличие ионосферных эффектов в вариациях ТЕС.

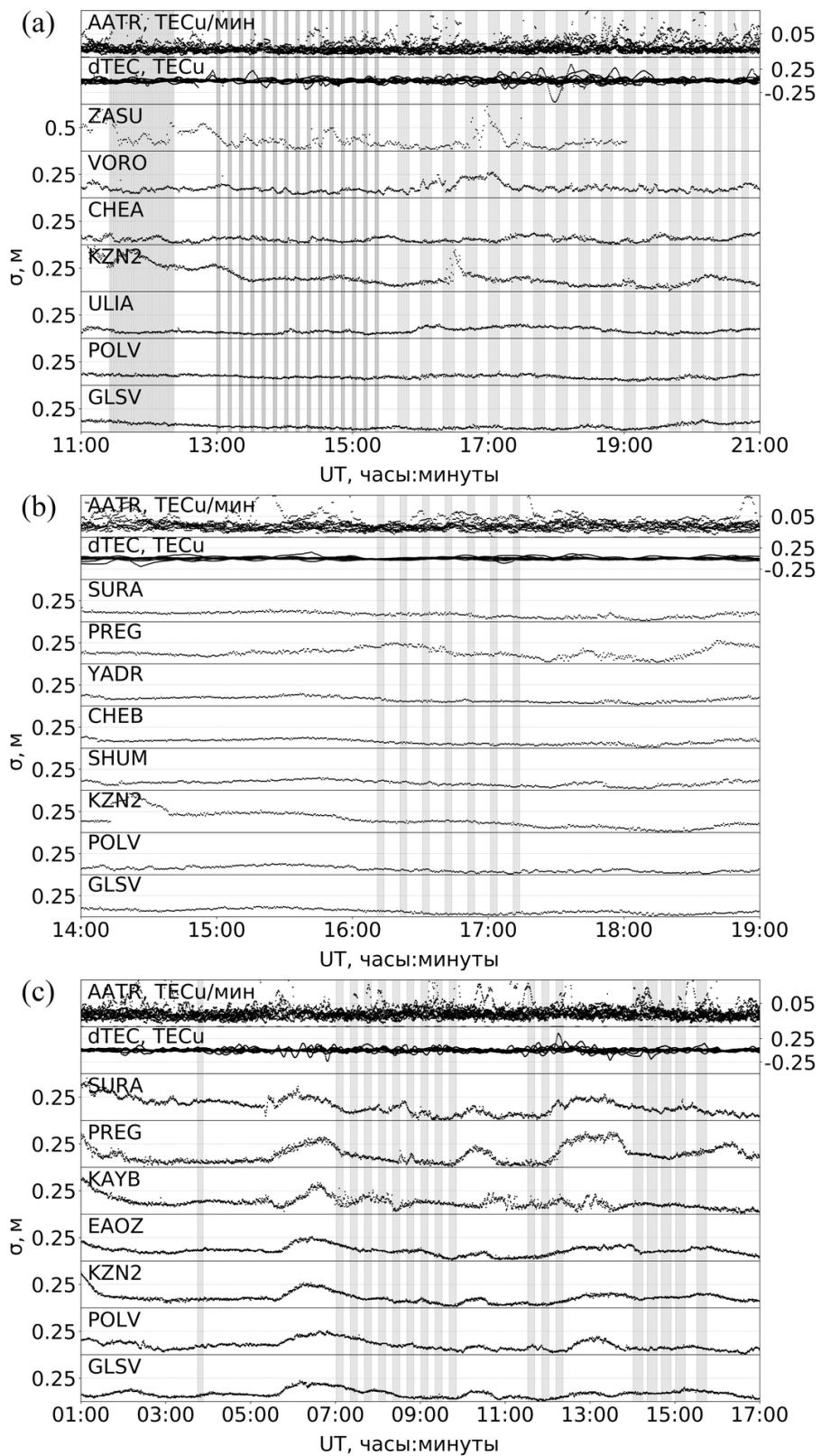


Рис. 13. Динамика полной ошибки позиционирования в двухчастотном кинематическом режиме PPP. (а) – 23 августа 2010 года, (б) – 19 сентября 2016 года, (с) – 20 сентября 2016 года. Серые вертикальные полосы – сеансы работы нагревательного стенда СУРА. ААТР и dTEC – индекс ААТР и вариации ТЕС с окном фильтрации 10-20 мин для ближайшей к стенду станции, соответственно.

На рис. 13 (b) данные показывают отсутствие какого-либо эффекта нагрева. Ошибка позиционирования остаётся на практически постоянном уровне. Более того, её значения во время нагрева даже меньше, чем при паузе работы стенда. На рис. 13 (c) вариабельность ошибки позиционирования больше, чем в другие дни. Причиной этого может являться более частая смена наблюдаемой группировки спутников. Таким образом, ни для одного из сеансов работы нагревательного стенда значительного увеличения ошибки позиционирования в режиме PPP зарегистрировано не было.

В табл. 4 представлены среднее и среднеквадратическое отклонение (СКО) полной ошибки позиционирования во время сеансов и пауз работы стенда. Усреднение производится за весь день. Интересно, но результаты также показывают более низкие значения ошибки во время нагрева, при этом СКО во время пауз, наоборот, практически всегда больше. Возможно, это обусловлено разной статистикой.

Таблица 4
Статистика полной ошибки позиционирования PPP.

Станция	Среднее \pm СКО ошибки во время нагрева, м	Среднее \pm СКО ошибки во время пауз, м
23 августа 2010 года		
ZASU	$0,27 \pm 0,56$	$0,36 \pm 0,70$
VORO	$0,10 \pm 0,05$	$0,11 \pm 0,15$
CHEA	$0,06 \pm 0,02$	$0,11 \pm 0,29$
KZN2	$0,15 \pm 0,10$	$0,14 \pm 0,13$
ULIA	$0,08 \pm 0,03$	$0,10 \pm 0,12$
POLV	$0,09 \pm 0,02$	$0,14 \pm 0,21$
GLSV	$0,06 \pm 0,03$	$0,10 \pm 0,13$
19 сентября 2016 года		
SURA	$0,08 \pm 0,02$	$0,10 \pm 0,08$
PREG	$0,13 \pm 0,06$	$0,15 \pm 0,15$
YADR	$0,07 \pm 0,03$	$0,12 \pm 0,12$
CHEB	$0,07 \pm 0,03$	$0,11 \pm 0,09$
SHUM	$0,09 \pm 0,03$	$0,12 \pm 0,10$
KZN2	$0,39 \pm 0,43$	$0,21 \pm 0,29$
POLV	$0,05 \pm 0,02$	$0,09 \pm 0,09$
GLSV	$0,06 \pm 0,03$	$0,08 \pm 0,08$
20 сентября 2016 года		
SURA	$0,11 \pm 0,04$	$0,15 \pm 0,10$
PREG	$0,11 \pm 0,04$	$0,15 \pm 0,16$
KAYB	$0,11 \pm 0,03$	$0,15 \pm 0,20$
EAQZ	$0,11 \pm 0,03$	$0,12 \pm 0,12$

KZN2	$0,10 \pm 0,03$	$0,13 \pm 0,17$
POLV	$0,09 \pm 0,04$	$0,12 \pm 0,09$
GLSV	$0,09 \pm 0,04$	$0,08 \pm 0,04$

В дополнение к двухчастотному кинематическому режиму PPP была рассчитана полная ошибка позиционирования для обычного одночастотного режима по L1C коду. Её динамика изображена на рис. 14. Панелям (а-с) соответствуют 23 августа 2010 года, 19 и 20 сентября 2016 года, соответственно. В данном режиме реальное состояние ионосферы не учитывается, поэтому ухудшение точности позиционирования из-за активного воздействия более вероятно. В целом видно, что уровень ошибки на один-два порядка выше, чем в режиме PPP. Тем не менее выделить синхронные увеличения, связанные с работой стенда СУРА, не представляется возможным. В эксперименте 23 августа 2010 года на рис. 14 (а) максимальное ухудшение точности позиционирования ожидалось на станции ZASU в силу её удаления от стенда и расположения антенны (видимая область – область воздействия). Однако по итогу даже для этого приёмного пункта не наблюдается видимой связи между динамикой ошибки и временем работы стенда.

В экспериментах 19 и 20 сентября 2016 года на рис. 14 (б, с), соответственно, собственные шумы измерений GPS были существенно меньше, чем в эксперименте 2010 года. Тем не менее на рис. 14 (б) видно, что вариации полной ошибки позиционирования для всех станций во время сеансов нагрева не превышают, а в некоторых случаях даже меньше аналогичных вариаций до начала работы стенда. На рис. 14 (с) также не удается выделить однозначной связи с активным воздействием. Так, во время первого импульса сеанса 14:01-14:54 UT на станциях KAYB и KZN2 наблюдается резкое увеличения ошибки, которое отсутствует на более близких к стенду приёмных пунктах, а на станции EAQZ, наоборот, имеет место даже уменьшение ошибки.

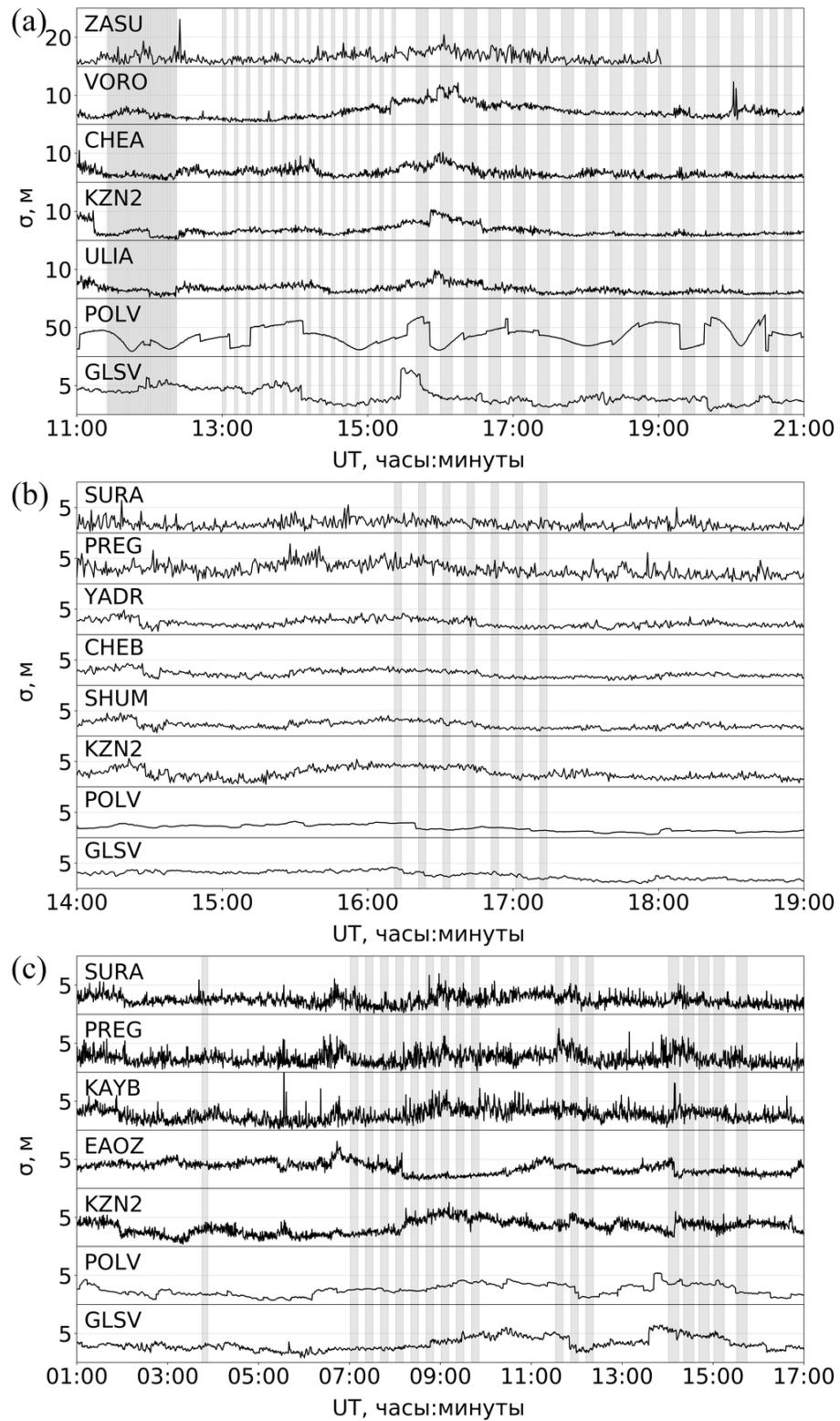


Рис. 14. Динамика полной ошибки позиционирования в одночастотном режиме по L1C коду. (а) – 23 августа 2010 года, (б) – 19 сентября 2016 года, (с) – 20 сентября 2016 года. Серые вертикальные полосы – сеансы работы нагревательного стенда СУРА.

ВЫВОДЫ

В целом, результаты, полученные в ГЛАВЕ 3, согласуются с результатами работы [27]. Во время геомагнитных бурь точность позиционирования PPP может снижаться в несколько раз. При этом области снижения пространственно коррелируют с областями максимальных вариаций TEC. В основном это авроральные регионы, в которых наиболее благоприятно образование неоднородностей электронной концентрации, оказывающих максимальное влияние на распространение радиосигналов, приводящих к их рассеянию, мерцаниям и т.п. Однако стоит отметить, что зарегистрированные на средних широтах ухудшения точности позиционирования PPP превышают результаты работы [27] (менее 0,32 м) и по своей величине сравнимы с ошибками, наблюдаемыми во время мощной солнечной вспышки класса X9.3 6 сентября 2018 года (более 0,5 м) [28], но по времени делятся дольше. Более того, анализ показал, что для рассмотренных геомагнитных бурь 25-26 августа 2018 года и 21-23 июня 2015 года этот эффект был даже продолжительнее, чем во время более мощной бури в День святого Патрика (17 марта) 2015 года.

Согласно результатам, полученным в ГЛАВЕ 4, можно сказать, что видимых эффектов в точности позиционирования (как в двухчастотном кинематическом режиме PPP, так и в обычном одночастотном режиме по L1C коду) во время работы нагревательного стенда СУРА обнаружено не было. Возможными причинами, объясняющими этот факт, являются относительно малая область нагрева и низкая амплитуда генерируемых ионосферных возмущений. В связи с локализацией области нагрева только небольшая часть лучей приёмник-спутник может пройти через неё. Это приводит к малому статистическому весу возможных ошибок при решении навигационной задачи и значительному снижению итоговой полной ошибки. Для приёмных станций, расположенных на значительном расстоянии от стенда, возможное влияние искусственных ПИВ может быть замаскировано естественной изменчивостью среднеширотной ионосферы. При этом вариации TEC с амплитудой 0,5 TECU приводят к вариациям дальности луча приёмник-спутник порядка 10 см. Заметить подобные эффекты относительно фоновых ошибок обычного одночастотного режима достаточно трудно. Тем не менее даже в более перспективном (точном и чувствительном) режиме PPP теоретически предсказанные эффекты в точности позиционирования на практике при рассмотренных экспериментах подтвердить не удалось.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследование точности позиционирования PPP в условиях естественной и искусственной ионосферной возмущённости. Подробно рассмотрены две геомагнитные бури за 25-26 августа 2018 года и 21-23 июня 2015 года. Получены и проанализированы глобальные распределения полной ошибки позиционирования, а также зависимости усреднённой ошибки от времени и широты для восточного и западного полушарий. Дополнительно проведено сравнение со спокойными днями. Во время главной фазы бури зафиксировано ухудшение точности позиционирования до 5 раз, которое пространственно коррелирует с областями максимальных вариаций ТЕС. Также рассмотрены эксперименты на нагревательном стенде СУРА за 23 августа 2010 года и 19-20 сентября 2016 года. Построены динамики полной ошибки позиционирования для нескольких станций, расположенных на разном расстоянии от стенда. Используются приёмники как в непосредственной близости к стенду, так и на значительном удалении (вплоть до 1000 км) от него. В дополнение к двухчастотному кинематическому режиму PPP проанализирована полная ошибка позиционирования для обычного одночастотного режима по L1C коду. Результаты показывают отсутствие видимых эффектов в точности позиционирования для обоих режимов во время работы стенда. Итоги магистерской диссертации включены в следующий список публикаций:

1. Yu. Yasyukevich, R. Vasilyev, K. Ratovsky, A. Setov, M. Globa, **S. Syrovatskii**, A. Yasyukevich, A. Kiselev, A. Vesnin. Small-Scale Ionospheric Irregularities of Auroral Origin at Mid-Latitudes during the 22 June 2015 Magnetic Storm and Their Effect on GPS Positioning // *Remote Sensing*. — 2020. — Vol. 12, no. 10.
2. Ю.В. Ярюкевич, **С.В. Сыроватский**, А.М. Падохин, В.Л. Фролов, А.М. Веснин, Д.А. Затолокин, Г.А. Курбатов, Р.В. Загретдинов, А.В. Першин, А.С. Ярюкевич. Точность позиционирования GPS в различных режимах при активном воздействии на ионосферу мощным КВ-излучением нагревного стенда СУРА // *Известия вузов. Радиофизика*. — 2020.

В заключение автор выражает благодарность за курирование в процессе подготовки дипломной работы научному руководителю – к.ф.-м.н., с.н.с. кафедры физики атмосферы МГУ им. М.В. Ломоносова **Падохину Артёму Михайловичу**. Также автор выражает глубокую благодарность за всестороннюю помошь научному консультанту – к.ф.-м.н., в.н.с. ИСЗФ СО РАН **Ярюкевичу Юрию Владимировичу**.

ЛИТЕРАТУРА

1. European GNSS Agency. GNSS Market Report. — 2017. — Режим доступа: https://www.gsa.europa.eu/system/files/reports/gnss_mr_2017.pdf (дата обращения: 06.04.2020).
2. J.F. Zumberge, M.B. Heflin, D.C. Jefferson, et al. Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks // *Geophysical Research*. — 1997. — Vol. 120, no. B3. — P. 5005–5017.
3. J.M. Dow, R.E. Neilan, C. Rizos. The international GNSS service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems // *Journal of Geodesy*. — 2009. — Vol. 83. — P. 191–198.
4. GPS: The Global Positioning System. — Режим доступа: <https://www.gps.gov> (дата обращения: 09.04.2020).
5. J.S. Subirana, J.M.J Zornoza, M.H. Pajares. GNSS Data Processing, Vol. I: Fundamentals and Algorithms // *ESA Communications*. — 2013.
6. G. Seeber. Satellite Geodesy, 2nd Edition. — Walter de Gruyter, 2003. — ISBN: [9783110175493](#).
7. M.G. Petovello. Does the Magnitude of the GNSS Receiver Clock Offset Matter? // *Inside GNSS*. — 2011. — Vol. 6, no. 2. — P. 23–25.
8. O. Montenbruck, P. Steigenberger, A. Hauschild. Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective // *GPS Solutions*. — 2015. — Vol. 19, no. 2. — P. 321–333.
9. B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, E. Wasle. GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. — Springer, 2008. — ISBN: [9783211730126](#).
10. Z. Hecimovic. Relativistic Effects on Satellite Navigation // *Tehnicki Vjesnik*. — 2013. — Vol. 20, no. 1. — P. 195–203.
11. L.L. Wells. Field Test Results on the Use of Translated GPS for TRIDENT I // *Navigation*. — 1987. — Vol. 34, no. 2. — P. 115–123.
12. R.D.J. Van Nee. Multipath Effects on GPS Code Phase Measurements // *Navigation*. — 1992. — Vol. 39, no. 2. — P. 177–190.

13. T.S. Rappaport. Wireless Communications: Principles and Practice, 2nd Edition. — Prentice Hall, 2002. — ISBN: [9788178086484](#).
14. F.K. Brunner, H. Hartinger, L. Troyer. GPS signal diffraction modelling: the stochastic SIGMA- δ model // Journal of Geodesy. — 1999. — Vol. 75, no. 5. — P. 259–267.
15. G. Xu. GPS: Theory, Algorithms and Applications, 2nd Edition. — Springer, 2007. — ISBN: [9783540727149](#).
16. J.V. Sickle. GPS for Land Surveyors. — Crc Press, 2001. — ISBN: [9781575040752](#).
17. H. Rishbeth. Basic Physics of the Ionosphere, 2nd Edition. — Propagation of Radiowaves, 2003. — ISBN: [9781849190411](#).
18. ITU-R P.618-12. Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems. — 2015.
19. J.A. Klobuchar. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. — 1987. — Vol. AES-23, no. 3. — P. 325–331.
20. E. Thebault, C.C. Finlay, C.D. Beggan, et al. International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation // [Earth, Planets and Space](#). — 2015. — Vol. 67.
21. C. Rizos. Network RTK Research and Implementation: A Geodetic Perspective // [Journal of Global Positioning Systems](#). — 2002. — Vol. 1, no. 2. — P. 144–150.
22. K.S. Jacobsen, S. Schafer. Observed effects of a geomagnetic storm on an RTK positioning network at high latitudes // [J. Space Weather Space Clim.](#). — 2012. — Vol. 2.
23. N. Bergeot, C. Bruyninx, P. Defraigne, et al. Impact of the Halloween 2003 ionospheric storm on kinematic GPS positioning in Europe // [GPS Solutions](#). — 2011. — Vol. 15, no. 2. — P. 171–180.
24. S. Lejeune, G. Wautelet, R. Warnant. Ionospheric effects on relative positioning within a dense GPS network // [GPS Solutions](#). — 2012. — Vol. 16, no. 1. — P. 105–116.
25. K.S. Jacobsen, Y.L. Andalsvik. Overview of the 2015 St. Patrick's day storm and its consequences for RTK and PPP positioning in Norway // [J. Space Weather Space Clim.](#). — 2016. — Vol. 6.

26. Y. Lou, F. Zheng, S. Gu, et al. Multi-GNSS precise point positioning with raw single-frequency and dual-frequency measurement models // *GPS Solutions*. — 2016. — Vol. 20, no. 4. — P. 849–862.
27. X. Luo, S. Gu, Y. Lou, et al. Assessing the Performance of GPS Precise Point Positioning Under Different Geomagnetic Storm Conditions during Solar Cycle 24 // *Sensors*. — 2018. — Vol. 18, no. 6. — P. 849–862.
28. Yu. Yasyukevich, E. Astafyeva, A. Padokhin, et al. The 6 September 2017 X-Class Solar Flares and Their Impacts on the Ionosphere, GNSS, and HF Radio Wave Propagation // *Space Weather*. — 2018. — Vol. 16, no. 8. — P. 1013–1027.
29. P.T. Jayachandran, R.B. Langley, J.W. MacDougall, et al. The Canadian High Arctic Ionospheric Network (CHAIN) // *Radio Science*. — 2009. — Vol. 44.
30. F. Zhou, D. Dong, W. Li, et al. GAMP: An open-source software of multi-GNSS precise point positioning using undifferenced and uncombined observations // *GPS Solutions*. — 2018. — Vol. 22.
31. World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. — Режим доступа: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (дата обращения: 20.04.2020).
32. Yu.V. Yasyukevich, A.V. Kiselev, I.V. Zhivetiev, et al. SIMuRG: System for Ionosphere Monitoring and Research from GNSS // *GPS Solutions*. — 2020. — Vol. 24.
33. SOHO LASCO CME CATALOG. — Режим доступа: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list (дата обращения: 21.04.2020).
34. A.V. Gurevich. Nonlinear effects in the ionosphere // *Phys. Usp.* — 2007. — Vol. 50, no. 11. — P. 1091–1121.
35. A.V. Streltsov, J.J. Berthelier, A.A. Chernyshov, et al. Past, Present and Future of Active Radio Frequency Experiments in Space // *Space Science Reviews*. — 2018. — Vol. 214, no. 8. — P. 1–222.
36. P. Stubbe. Review of ionospheric modification experiments at Tromso // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. — 1996. — Vol. 58, no. 1-4. — P. 349–368.
37. L.M. Erukhimov, S.A. Metelev, E.N. Myasnikov, et al. Artificial ionospheric turbulence (review) // *Radiophys Quantum El.* — 1987. — Vol. 30, no. 2. — P. 208–225.

38. T.B. Leyser. Stimulated electromagnetic emissions by high-frequency electromagnetic pumping of the ionospheric plasma // *Space Science Reviews*. — 2001. — Vol. 98, no. 3. — P. 223–238.
39. P. Stubbe, T. Hagfors. The Earth’s ionosphere: A wall-less plasma laboratory // *Surveys in Geophysics*. — 1997. — Vol. 18, no. 1. — P. 57–127.
40. С.М. Грач, Е.Н. Сергеев, Е.В. Мишин и др. Динамические характеристики плазменной турбулентности ионосферы, инициированной воздействием мощного коротковолнового радиоизлучения // *Усп. физ. наук*. — 2016. — Т. 186, № 11. — С. 1189–1228.
41. L.F. Chernogor, F.L. Frolov, G.P. Komrakov, et al. Variations in the ionospheric wave perturbation spectrum during periodic heating of the plasma by high-power high-frequency radio waves // *Radiophys Quantum El.* — 2011. — Vol. 54, no. 2. — P. 75–88.
42. L.F. Chernogor, F.L. Frolov. Features of the wave disturbances in the ionosphere during periodic heating of the plasma by the SURA radiation // *Radiophys Quantum El.* — 2013. — Vol. 56, no. 5. — P. 276–289.
43. E. Mishin, E. Sutton, G. Milikh, et al. F2-region atmospheric gravity waves due to high-power HF heating and subauroral polarization streams // *Geophysical Research Letters*. — 2012. — Vol. 39, no. 11.
44. R. Pradipita, M.C. Lee, J.A. Cohen, et al. Generation of Artificial Acoustic-Gravity Waves and Traveling Ionospheric Disturbances in HF Heating Experiments // *Earth, Moon, and Planets*. — 2015. — Vol. 116, no. 1. — P. 67–78.
45. V.E. Kunitsyn, E.S. Andreeva, V.L. Frolov. Sounding of HF heating-induced artificial ionospheric disturbances by navigational satellite radio transmissions // *Radio Science*. — 2012. — Vol. 47, no. 4.
46. P.A. Bernhardt, C.L. Siefring, S.J. Briczinski, et al. Large ionospheric disturbances produced by the HAARP HF facility // *Radio Science*. — 2016. — Vol. 51, no. 7. — P. 1081–1093.
47. E.D. Tereshchenko, M.O. Kozlova, O.V. Evstafiev, et al. Irregular structures of the F layer at high latitudes during ionospheric heating // *Annales Geophysicae*. — 2000. — Vol. 18. — P. 1197–1209.

48. E.D. Tereshchenko, B.Z. Khudukon, A.V. Gurevich, et al. Radio tomography and scintillation studies of ionospheric electron density modification caused by a powerful HF-wave and magnetic zenith effect at mid-latitudes // *Physics Letters A.* — 2004. — Vol. 325, no. 5-6. — P. 381–388.
49. N. Jakowski, E. Sardon, E. Engler, et al. Relationships between GPS-signal propagation errors and EISCAT observations // *Annales Geophysicae.* — 1997. — Vol. 14, no. 12. — P. 1429–1436.
50. H.A. Marques, H.A.S. Marques, M. Aquino, et al. Accuracy assessment of Precise Point Positioning with multi-constellation GNSS data under ionospheric scintillation effects // *J. Space Weather Space Clim.* — 2018. — Vol. 8.
51. В.Л. Фролов. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Монография. — ННГУ, 2017.
52. V.V. Belikovich, S.M. Grach, A.N. Karashtin. The SURA facility: Study of the atmosphere and space // *Radiophys Quantum El.* — 2007. — Vol. 50, no. 7. — P. 497–526.
53. J.M. Juan, J. Sanz, A. Rovira-Garcia, et al. AATR an ionospheric activity indicator specifically based on GNSS measurements // *J. Space Weather Space Clim.* — 2018. — Vol. 8.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ВКЛАДЫ ИОНОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ В РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Эффект	Зависимость от частоты	0,1 ГГц	0,25 ГГц	0,5 ГГц	1 ГГц	3 ГГц	10 ГГц
Фарадеевское вращение	$1/f^2$	10800°	1728°	432°	108°	12°	1,1°
Групповая задержка	$1/f^2$	25 мкс	4 мкс	1 мкс	0,25 мкс	0,028 мкс	0,0025 мкс
Рефракция	$1/f^2$	< 1°	< 0,16°	< 2,4'	< 0,6'	< 4,2''	< 0,36''
Вариации направления прибытия	$1/f^2$	20'	3,2'	48''	12''	1,32''	0,12''
Поглощение (высокие широты)	$1/f^2$	5 дБ	0,8 дБ	0,2 дБ	0,05 дБ	0,006 дБ	0,0005 дБ
Поглощение (низкие широты)	$1/f^2$	< 1 дБ	< 0,16 дБ	< 0,04 дБ	< 0,01 дБ	< 0,001 дБ	< 0,0001 дБ
Дисперсия	$1/f^3$	0,4 пс/Гц	0,026 пс/Гц	0,0032 пс/Гц	0,0004 пс/Гц	$1,5 \times 10^{-5}$ пс/Гц	4×10^{-7} пс/Гц

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ПРОГРАММА РАБОТЫ СТЕНДА СУРА

Дата	Время работы, УТ	Частота ВН, кГц	Поляризация	Наклон луча, град	Программа работы	Эффективная мощность, МВт
23 августа 2010 г.	11:25-11:43	5455	O	12	[+1,5 мин, -30 с]	12
	11:43-11:49	5475	O	12	[+1,5 мин, -30 с]	12
	11:49-12:08	5435	O	12	[+1,5 мин, -30 с]	12
	12:08-12:13	5475	O	12	[+1,5 мин, -30 с]	12
	12:13-12:23	5400	O	12	[+1,5 мин, -30 с]	12
	13:00-15:30	4785	O	12	[+3 мин, -7 мин]	80
	15:40-20:20	4785	O	12	[+10 мин, -10 мин]	80
	20:20-20:55	4785	O	12	[+6 мин, -6 мин]	80
19 сентября 2016 г.	16:11-17:14	4785	O	12	[+3 мин, -7 мин]	100
20 сентября 2016 г.	03:45-03:53	4785	O	0	[+9 с, -1 с]	45
	07:01-09:51	5700	X	12	[+10 мин, -10 мин]	120
	11:32-12:22	5455	O	12	[+10 мин, -10 мин]	130
	14:01-14:54	4785	O	12	[+14 мин, -6 мин]	85
	15:01-15:32	4785	O	12	[+14 мин, -16 мин]	85

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

СПИСОК ПРИЁМНИКОВ GPS ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА НА СТЕНДЕ СУРА

Название	Широта, °N	Долгота, °E	Расстояние от стенда СУРА, км	Расстояние от области нагрева на 250 км, км	Модель приёмника	Модель антенны
SURA	56,15	46,1	0	50	JAVAD Alpha-G3	JAVAD GrAnt-G3T
PREG	56,15	46,1	0	50	JAVAD Prego	JAVAD MarAnt+
ZASU	56,03	46,26	16	40	JAVAD Lexon	JAVAD MarAnt+
VORO	56,05	45,86	18	40	JAVAD Sigma-G3T	JAVAD GrAnt-G3T
YADR	55,95	46,2	23	30	PrinCe	CHCC220
CHEB	56,13	47,29	73	92	PrinCe	CHCC220
CHEA	56,08	47,29	74	91	EGGDT_3	TPSPG_A
SHUM	55,5	46,42	75	34	PrinCe	CHCC220
KAYB	55,4	48,2	155	142	NovAtel DL-V3	NovAtel 702-GG
EAOZ	55,84	48,81	172	176	Trimble NetR9	Topcon CR3-GGD
KZN2	55,79	49,12	192	195	Trimble NetR9	TRM59800.00 SCIS
ULIA	54,25	48,31	253	218	E_GGD_2	JPSREGA
POLV	49,6	34,54	1061	1026	LEICA G	LEIAR10
GLSV	50,36	30,5	1217	1191	NovAtel OEM	NovAtel 702-GG