

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 «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 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 Ещё не придумал . . . . .	5
1.1 Общая информация о GPS . . . . .	5
ЛИТЕРАТУРА . . . . .	7

## 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<sup>1</sup>: 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 ГНСС-сигнала через ионосферу он подвергается рассеянию на неоднородностях электронной концентрации. Наибольший эффект оказывают неоднородности размера порядка радиуса первой зоны Френеля  $\sqrt{\lambda Z}$  ( $\lambda$  – 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, по своей морфологии 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 радиокomплекс “Сура”, который расположен вблизи Нижнего Новгорода (56.1°N, 46.1°E).

---

<sup>1</sup>Полностью начнут функционировать в течение 2020 года.

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 (differencial 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, смещения часов и орбиты спутника) могут быть устранены путем формирования разницы между измерениями. Поэтому метод дифференциального позиционирования широко используется для приложений, которые требуют высокой точности. Однако эффективность метода дифференциального позиционирования в значительной степени зависит от расстояния между приёмниками: при увеличении расстояния качество позиционирования ухудшается. Это является основным ограничением метода дифференциального позиционирования. Кроме того, требование одновременной работы по меньшей мере двух приёмников технически реализуется более трудно, 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 введён для статических приложений [2], но в дальнейшем был изменён и для кинематических приложений. PPP расширяет возможности SPP, используя точные эфемериды спутника, полученные, например, от International GPS Service (IGS), вместо стандартного широкополосного навигационного сообщения.

В соответствии с вышеизложенным, данная работа состоит из двух частей. Первая часть посвящена анализу динамики ошибки позиционирования во время нескольких сильных геомагнитных бурь за последнее десятилетие в глобальном масштабе. Основная задача состоит в том, чтобы определить изменения точности позиционирования в различных широтно-долготных областях в зависимости от характеристик бурь. Вторая часть работы посвящена анализу динамики ошибки позиционирования во время работы радиокomплекса “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

## Ещё не придумал

### 1.1 Общая информация о GPS

Система GPS (от англ. Global Positioning System) была разработана Министерством обороны США с целью стать главной навигационной системой военного назначения. Полная работоспособность GPS официально была объявлена 17 июля 1995 года [3]. Созвездие GPS, согласно первоначальному проекту, включает в себя 24 спутника, которые распределены по 6 орбитальным плоскостям с наклоном 55 градусов относительно экватора. Каждая орбитальная плоскость, соответственно, содержит 4 спутника, которые вращаются вокруг Земли по круговой орбите на высоте около 20200 км и периодом 11 часов 58 минут.

Спутники передают сигналы на двух несущих частотах: L1 (1575,42 МГц) и L2 (1227,60 МГц). Обе несущие получаются от одного тактового (атомного) генератора с частотой 10,23 МГц и моделируются псевдослучайным PRN-кодом (от англ. Pseudo Random Number). PRN-код уникален для каждого спутника и бывает двух типов: C/A-код (от англ. Coarse/Acquisition), который предназначен для системы позиционирования стандартной точности SPS (от англ. Standard Positioning Service) и находится в свободном доступе для всех пользователей, и P-код (от англ. Precision), который предназначен для системы позиционирования высокой точности PPS (от англ. Precise Positioning Service) и зарезервирован для военных целей, поэтому дополнительно шифруется криптоустойчивым Y-кодом. C/A-код имеет частоту следования импульсов 1,023 МГц и период повторения 1 мс. Используется только для модуляции несущей L1. P-код имеет частоту следования импульсов уже в 10 раз больше (10,23 МГц) и период повторения 7 суток. Используется для модуляции двух несущих: L1 и L2. Помимо этого, обе несущие моделируются ещё навигационным сообщением частотой 50 Гц, которое включает в себя эфемериды (точную информацию о параметрах орбиты для каждого спутника) и альманах (грубую информацию о параметрах орбиты для всей группировки спутников). Схема формирования сигналов GPS представлена на рис. 1.

С 1987 года GPS использует Всемирную геодезическую систему координат WGS-84 (от англ. World Geodetic System 1984), которая была разработана Национальным агентством видовой и картографической информации NIMA (от англ. National Imagery and Mapping Agency) под предводительством Министерства обороны США. С момента своего создания WGS-84 претерпевала множество изменений. В настоящее время

последней реализацией WGS-84 является G1150 от 2004 года.

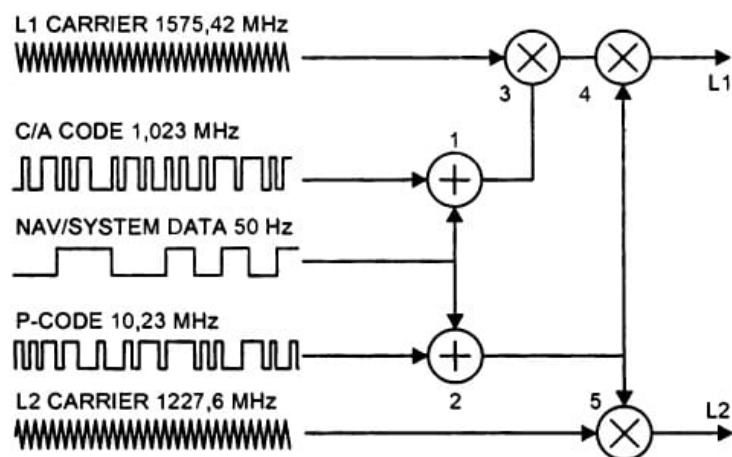


Рис. 1: Схема формирования сигналов GPS [4].

GPS использует специальную непрерывную шкалу времени без поправок на високосные секунды GPST (от англ. GPS Time), которая берёт своё начало 6 января 1980 года в 0:00 UTC (от англ. Coordinated Universal Time). Эпоха GPST определяется через номер недели GPS и номер секунды в неделе. Иногда (для удобства) ещё используется номер дня в неделе, отсчёт которых берёт своё начало в воскресенье. Например, 1 января 2020 года 0:00 UTC соответствует 2086 недель GPS и 259200 секунд.

Проект GPS постоянно модернизируется. В настоящее время существует и функционирует несколько типов спутников GPS. Их список представлен в табл. 1. Созвездие GPS включает в себя 32 действующих спутника, 31 из которых используется по целевому назначению и 1 выведен на техобслуживание. Также постепенно интегрируются новые коды для модуляции сигналов: L2C-код для сигнала L2, L5C-код для нового общедоступного сигнала L5 (1176,45 МГц), M-код для замены старого Y-кода.

Блок	Период запусков	Работают сейчас	На техобслуживании
I	1978—1985	0	0
II	1989—1990	0	0
IIA	1990—1997	0	0
IIR	1997—2004	10	0
IIR-M	2005—2009	7	1
IIF	2010—2016	12	0
III	2018—2023	2	0

Таблица 1: Список запусков спутников GPS [5].

## ЛИТЕРАТУРА

1. European GNSS Agency. GNSS Market Report. — 2017. — № 5. — Режим доступа: [https://www.gsa.europa.eu/system/files/reports/gnss\\_mr\\_2017.pdf](https://www.gsa.europa.eu/system/files/reports/gnss_mr_2017.pdf) (дата обращения: 06.04.2020).
2. Zumberge J.F., Heflin M.B., Jefferson D.C., Watkins M.M., and Webb F.H. Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks // Geophysical Research. — 1997. — Т. 120, № B3. — С. 5005–5017.
3. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., and Wasle E. GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. — Springer, 2008. — ISBN: 9783211730126.
4. Система NAVSTAR-GPS. — Режим доступа: <http://catamobile.org.ua/sistema-navstar-gps.html> (дата обращения: 09.04.2020).
5. GPS. — Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/GPS> (дата обращения: 09.04.2020).