

На правах рукописи

Корогодин Илья Владимирович

**Разработка новых навигационных сигналов, алгоритмов
их обработки и наземных псевдоспутников для
повышения точности и помехоустойчивости приемников
ГЛОНАСС**

Специальность 2.2.16 — «Радиолокация и радионавигация»

Диссертация на соискание учёной степени
доктора технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Перов Александр Иванович

Москва — 2022

Оглавление

Оглавление	1
Введение	5
1 Анализ факторов, ограничивающих точность навигационных определений	18
1.1 Техники позиционирования по сигналам ГНСС и задачи с их помощью решаемые	18
1.1.1 Техники позиционирования: SPP, DGNSS, RTK, PPP	18
2 Глава про симуляцию: с картинками и табличками	24
2.1 Обобщенная модель навигационного сигнала ГНСС	24
2.1.1 Модель традиционного BPSK сигнала	24
Заключение	27
Список литературы	28
Приложение А Процедуры и схемы сбора установок и стендов	37
А.1 Раздел в приложении	37

Обозначения и сокращения

АГС	- астрономо-геодезическая сеть
АЗН-В	- автоматическое зависимое наблюдение в режиме вещания
АКФ	- автокорреляционная функция
АРК	- автоматический радиокompас
АРМ	- автоматизированное рабочее место
АЧХ	- амплитудно-частотная характеристика
БПРМ	- ближняя приводная радиостанция с маяком
БПФС	- блок приема и формирования сигналов
ВПП	- взлетно-посадочная полоса
ВПр	- высота принятия решения
ВРЛ	- вторичный радиолокатор
ВС	- воздушное судно
БЧХ	- Боуза-Чоудхури-Хоквингема (коды)
ГВПП	- взлетно-посадочная полоса с грунтовым покрытием
ГНСС	- глобальная навигационная спутниковая система
ГРМ	- глиссадный радиомаяк
ДИСС	- доплеровский измеритель скорости и сноса
ДПРМ	- дальняя приводная радиостанция с маяком
ЕСКД	- единая система конструкторской документации
ИВПП	- взлетно-посадочная полоса с искусственным покрытием
ИКАО	- международная организация гражданской авиации
ИКД	- интерфейсный контрольный документ
ИНС	- инерциальные навигационные системы
ЗИП	- запасные части, инструменты и принадлежности
КГС	- курсо-глиссадная система
КГС	- космическая геодезическая сеть
КВС	- командир воздушного судна
КРМ	- курсовой радиомаяк
КСУ	- комплект средств управления
ЛА	- летательный аппарат
ЛРНС	- локальная радионавигационная система

МВС	- минимальная высота снижения
МРМ	- маркерный радиомаяк
МСЭ	- международный союз электросвязи
НВО	- навигационно-временные определения
НИР	- научно-исследовательская работа
ОГ	- опорный генератор
ОКР	- опытно-конструкторская работа
ОНТД	- отчетная научно-техническая документация
ОПРС	- отдельная приводная радиостанция
ОРЛ	- обзорный радиолокатор
ПАВ	- поверхностная акустическая волна
ПЛ	- программируемая логика
ПЛИС	- программируемая логическая интегральная схема
ПНК	- пилотажно-навигационный комплекс
ПП	- приемопередатчик
ПРЛ	- посадочный радиолокатор
ПРМГ	- посадочная радиомаячная группа
ПРС	- приводная радиостанция
ПС	- псевдоспутник
ПС	- процессорная система
ПСП	- псевдослучайная последовательность
РЛЭ	- руководство по летной эксплуатации
РМ	- радиомаяк
РСБН	- радиотехническая система ближней навигации
РСДН	- радиотехническая система дальней навигации
РЭБ	- радио-электронная борьба
СДКМ	- система дифференциальной коррекции и мониторинга
СнК	- система-на-кристалле
СП	- система посадки
СПМ	- спектральная плотность мощности
СПМО	- специальное программно-математическое обеспечение
СПМО ПП	- СПМО помехоустойчивого приема
СЧ	- стандарт частоты

СЧ	- составная часть
ТТЗ	- тактико-техническое задание
УМ	- усилитель мощности
УХЛ	- умеренный и холодный макроклиматический район
ФАГД	- фундаментальная астрономо-геодезическая сеть
ФД	- функциональные дополнения (см. SBAS и GBAS)
BOC	- Binary Offset Carrier
DMA	- Direct Memory Access
DME	- Distance Measurement Equipment
EVS	- Enhanced Vision System
FAP	- Final Approach Point
FIS	- Flight Information Service
GBAS	- Ground Based Augmentation System
GLS	- GNSS Landing System
ICAO	- International Civil Aviation Organization
ILS	- Instrument Landing System (см. КГС метрового диапазона)
MLS	- Microwave Landing System (см. КГС сант-ого диапазона)
LDPC	- Low-density parity-check code
NDB	- Non-directional beacon
PAPI	- Precision Approach Path Indicator
PL	- Programmable Logic
PS	- Processor System
SBAS	- Satellite Based Augmentation System
TIS	- Traffic Information Service
TMBOC	- Time Multiplexed Binary Offset Carrier
WAM	- Wide Area Multilateration
WGS	- World Geodetic System

Введение

Актуальность темы исследования

Глобальные навигационные системы (ГНСС) – системы позиционирования, развернутые США (NAVSTAR GPS), Россией (ГЛОНАСС), Евросоюзом (Galileo) и Китаем (Beidou). Они показали свою эффективность как в повседневной жизни, так и в военном деле. В первом случае они обеспечивают работу логистических систем, транспорта, синхронизацию объектов инфраструктуры, проведение геосъемки, таргеттируют рекламу, связывают предприятия сферы услуг с их клиентами и т.д. Во втором случае, в военной технике и военном деле, ГНСС выступают основой высокоточного оружия, используется для контроля и выполнения операций и т.д. Распространению ГНСС поспособствовало удобство их использования, технологичность аппаратуры потребителей, глобальная доступность, скорость решения задачи и достаточная для большинства приложений точность.

Но чем больше ГНСС проникает в жизнь и технику, тем выше риски её отказа. Навигационные спутники расположены в двух десятках тысяч километров от поверхности земли, а мощность навигационных сигналов, подводимая к антенне, не превышает сотни Ватт. В результате двух этих обстоятельств поток мощности навигационного сигнала у потребителя крайне мал. Навигационный сигнал может быть легко перебит даже слабым источником помех.

Вопросы повышения точности навигационного сервиса ГНСС и их работы в условиях действия помех исследуются всё время существования этих систем, а это уже более 40 лет. Эти исследования, разработки и развитие электронных технологий приводили к поступательному улучшению сервиса, расширяли сферу применения ГНСС. Но на фоне поступательного развития можно выделить ряд прорывов. Одни из них связаны с изменением работы космического сегмента, другие — с совершенствованием навигационной аппаратуры потребителей.

Таковыми прорывами с точки зрения повышения точности определения местоположения стали:

- изобретение техник позиционирования на базе измерений задержек фазы несущей навигационных сигналов,

- отключение SA-режима (англ. Selective Availability) в системе NAVSTAR GPS,
- введение сигналов в нижнем L-диапазоне, что снизило ошибки, вызванные распространением сигнала в ионосфере,
- создание мультисистемных приемников, что увеличило количество наблюдаемых спутников в условиях города и снизило геометрический фактор,
- введение широкополосных сигналов, существенно снижающих ошибку многолучевого распространения.

Существенное повышение помехоустойчивости навигационной аппаратуры потребителей (НАП) обеспечили:

- создание антенных компенсаторов помех, адаптивно изменяющих диаграмму направленности и направляющих её ноль в направлении источника помех,
- создание комплексированных спутнико-инерциальных систем, уменьшающих наблюдаемую динамическую нагрузку для алгоритмов обработки навигационных сигналов,
- развитие алгоритмов некогерентной обработки сигналов, позволяющих сохранять предоставление навигационного сервиса ценой снижения его точности,
- введение защищенных сигналов, устойчивых к воздействию помех, в том числе имитационных.

Эти технические решения позволили существенно поднять потенциал ГНСС. Обозначенные 30-40 лет назад типичной можно было назвать погрешность определения местоположения в 50-100 метров. Для нарушения работы навигационного приемника военного назначения было достаточно помехи на 30 дБ превышающей мощность навигационного сигнала. Сегодня же геодезические приемники обеспечивают точность позиционирования сантиметрового уровня, а некоторые образцы военных приемников могут пережить действие помехи на 120 дБ превышающей навигационный сигнал.

Но эти достижения, несмотря на грандиозный прирост показателей, во многом остаются лишь потенциалом. Подавляющее большинство НАП, более 99.9% как в количественном выражении, так и в стоимостном, не использует ни новые широкополосные сигналы, ни антенные решетки, ни фазовые измерения. Причин низкого проникновения несколько. Во-первых, высокая точность позиционирования или высокая помехоустойчивость достигается при использовании габаритной, сложной и, как следствие, дорогой и требовательной к энергопотреблению НАП. Во-вторых, кардинальное повышение точности и помехоустойчивости достигается не всегда, а только в благоприятных условиях: подавление помех в антенном компенсаторе нарушается, если число источников помех превышает количество антенных элементов, высокоточное решение может дать аномальные и неконтролируемые ошибки при возникновении многолучевых условий приема и т.д.

Таким образом, у гражданских потребителей возникает потребность в получении **стабильно** точного решения, а у военных потребителей остро стоит потребность в помехоустойчивой НАП, продолжающей работать при действии большого числа источников помех, либо обладающей меньшими габаритами.

Степень разработанности темы исследования

Повышению помехоустойчивости приема сигналов и точности оценки их параметров в общем, и ГНСС в частности, посвящено множество работ. Теория и техника приема навигационных сигналов базируется на фундаментальной теории оптимального приема и потенциальной помехоустойчивости, к автором которой можно причислить В.А. Котельникова, А.Н. Колмогорова, Р.Л. Стратоновича, Н. Винера, К. Шеннона, Р. Калмаа, Р. Бьюси

В настоящей работе для решения задачи повышения качества работы системы ГЛОНАСС в неблагоприятных условиях автор фокусируется на группе методов рассматривается введение новых навигационных сигналов и алгоритмов их обработки. При этом для гражданских и специальных потребителей предлагаются сигналы принципиально разной структуры, в разных частотных диапазонах с разными схемами их обработки. Для первых определены способы снижения ошибок многолучевости при сохранении простоты обработки сигналов, для вторых предлагается пространственно-временная обработка с

использованием многоэлементных антенн и комплексирования с инерциальными датчиками.

Комбинируемые в данной работе методы хорошо проработаны другими авторами.

Разработке новых навигационных сигналов и алгоритмов их обработки посвящены работы Перова А.И., Харисова В.Н., Ефименко В.С. и других отечественных специалистов и ученых. Из иностранных авторов можно выделить публикации Джона Бетца [1—7], Криса Хегарти [8—11], Филиппа Дафеша [12—15], Гунтера Хейна [16; 17], Джозе-Энджела Авила-Родригеса [18—24], Энтони Пратта [25; 26], Дженга Йо [27—40], Ти Фана [41—43], Эмили Ребейрол [44—47].

Большой вклад в развитие теории и техники измерения параметров сигналов ГНСС, базирующейся на фундаментальных положениях теории оптимального приема и потенциальной помехоустойчивости, разработанной Колмогоровым А.Н., Винером Н., Стратоновичем Р.Л., Котельниковым В.А., Шенноном К., Калманом Р., Бьюси Р., Тихоновым В.И., Левиным Б.Р., Сейджем Э., Мелсом Дж., Ширманом Я.Д., Фальковичем С.Е., Ярлыковым М.С., [18 - 31], внесли такие ученые как Шебшаевич В.С., Шебшаевич Б.В., Кункулькин И.Е., Уч. Но 31с 19 Харисов В.Н., Ефименко В.С., Перов А.И., Казаринов М.Ю., Ипатов В.П., Поваляев А.А., Власов И.Б., Жодзишский М.И. и др.

Локальные навигационные системы [40]

Цели и задачи

Цель диссертационной работы — разработка и обоснование предложений о модернизации системы ГЛОНАСС, направленной на повышение помехоустойчивости навигационной аппаратуры потребителей и точности навигационных определений, в том числе в условии действия множества источников помех, создание технических решений для проверки этих предложений и оценка их эффективности.

Достижение намеченной цели потребовало решения следующих задач:

- а) Разработка обобщенной модели навигационного сигнала и модели канала приемника для его обработки.

- б) Анализ факторов ограничивающих точность навигационных определений и помехоустойчивость навигационных приемников ГНСС.
- в) Разработка навигационного сигнала повышенной точности для гражданских потребителей, включая разработку новых методов модуляции и выбор частотного диапазона, а также создание технических решений для приема такого сигнала.
- г) Разработка навигационного сигнала для специальных потребителей, снижающего эффективность заградительных и имитационных помех, а также создание технических решений для приема такого сигнала.
- д) Разработка системы наземных псевдоспутников для навигационного обеспечения потребителей на ограниченной территории в условии подавления сигналов ГЛОНАСС.

Научная новизна

- а) Создана обобщенная математическая модель навигационного сигнала, описывающая сигналы всех существующих ГНСС.
- б) Предложена модель канала обработки навигационного сигнала ГНСС, удовлетворяющего этой обобщенной математической модели.
- в) Предложена многокомпонентная схема модуляции навигационных сигналов с использованием разряженных поднесущих
- г) Создан метод приема многокомпонентных сигналов с помощью нескольких радиочастотных трактов с полосой и частотой дискретизации, меньшими полосы этого сигнала.
- д) Создан метод двухпоточной модуляции навигационного сигнала предсказуемыми и непредсказуемыми навигационными данными
- е) Выявлены правила взаимных преобразований одних показателей качества процедуры поиска навигационного сигнала в другие в условии ограничения вычислительных ресурсов.

- ж) Разработан алгоритм компенсации фазовых сдвигов навигационного сигнала при его обработке в НАП с антенным компенсатором помех
- и) Создан метод синтеза расширенного фильтра Калмана с линеаризацией логарифма функции правдоподобия в произвольной точке пространства состояний позволяет синтезировать алгоритмы обработки навигационных сигналов ограничением к виду опорного сигнала коррелятора.
- к) Разработан алгоритм фокусировки сигналов антенной решетки навигационного приемника на основе оценки разности фаз сигналов отдельных антенных элементов.
- л) Разработка алгоритм комплексирования навигационного приемника с датчиками угловых скоростей для повышения чувствительности и помехоустойчивости алгоритмов фокусировки для объектов с высокой динамикой изменения ориентации.
- м) Разработан многовходовый коррелятор для реализации алгоритмов обработки навигационных сигналов в приемниках ГНСС с многоэлементной антенной системой.
- н) Разработаны требования к системе наземных псевдоспутников как подсистеме ГЛОНАСС
- п) Разработан метод синхронизации и калибровки псевдоспутников
- р) Разработан сигнал системы наземных псевдоспутников

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы:

- а) Обобщенная математическая модель навигационного сигнала ГНСС позволяет разрабатывать математические и имитационные модели узлов и сред, их преобразующих, применимые ко всем типам сигналов существующих ГНСС.

- б) Модель канала обработки обобщенного сигнала позволяет создавать имитационные модели первичной обработки сигналов, применимые ко всем типам сигналов существующих ГНСС.
- в) Показано, что при использовании OFDM сигнала в качестве навигационного исключение части поднесущих приводит к снижению границы Рао-Крамера потенциальных ошибок оценивания задержки огибающей сигнала для канала с многолучевым распространением и аддитивным белым гауссовским шумом.
- г) Показано, что предсказуемость части навигационного сообщения может быть использована для увеличения времени когерентного накопления в следящих системах за параметрами навигационного сигнала.
- д) Правила взаимных преобразований показателей качества процедуры поиска позволяют прогнозировать изменение этих характеристик при изменении априорных данных о параметрах сигнала или при изменении типа сигнала.
- е) Метод синтеза расширенного фильтра Калмана с линеаризацией логарифма функции правдоподобия в произвольной точке пространства состояний позволяет синтезировать алгоритмы обработки навигационных сигналов ограничением на опорный сигнал коррелятора.
- ж) Экспериментально показана возможность синхронизации сети псевдоспутников с помощью их же навигационных сигналов.

Практическая значимость работы:

- а) Обобщенная математическая модель навигационного сигнала ГНСС позволяет разрабатывать алгоритмы их обработки одновременно применимые ко всем сигналам навигационных систем ГЛОНАСС, NAVSTAR GPS, Galileo и Beidou и их функциональных дополнений.
- б) Модель канала обработки навигационного сигнала, удовлетворяющего обобщенной модели навигационного сигнала ГНСС, позволяет использовать в приемниках универсальные каналы обработки, подходящие для любого типа навигационного сигнала.

- в) Разрежение поднесущих многокомпонентных сигналов позволяет снизить межсистемные помехи и снизить ошибки оценки задержки при многолучевом распространении сигнала.
- г) Метод приема многокомпонентных сигналов с помощью нескольких радиочастотных трактов позволяет осуществлять прием широкополосных навигационных сигналов, используя доступную электронную компонентную базу, не позволяющую осуществить прием этих сигналов другими методами.
- д) Правила взаимных преобразований показателей качества процедуры поиска позволяют осуществлять выбор стратегии поиска сигналов спутника в многочастотных навигационных приемниках в зависимости от доступных априорных данных.
- е) Алгоритм компенсации фазовых сдвигов навигационного сигнала при его обработке в НАП с антенным компенсатором помех позволяет формировать несмещенные оценки фазы несущей навигационного сигнала.
- ж) Метод синтеза расширенного фильтра Калмана с линеаризацией логарифма функции правдоподобия в произвольной точке пространства состояний позволяет предъявлять ограничения к виду опорного сигнала коррелятора.
- и) Алгоритм фокусировки сигналов антенной решетки навигационного приемника на основе оценки разности их фаз позволяет повысить эффективное значение отношения сигнал/шум и снизить погрешность оценки параметров сигналов в отсутствие данных об ориентации, диаграммах направленности антенных элементов и задержках в радиочастотном тракте.
- к) Комплексирование навигационного приемника с многоэлементной антенной системой и датчика угловых скоростей позволяет увеличить его помехоустойчивость.
- л) Использование многовходового канала коррелятора позволяет снизить расход логических блоков на реализацию коррелятора, а также снизить интенсивность обмена данными при управлении им.

- м) Разработанная система наземных псевдоспутников позволяет осуществлять навигационное обеспечение потребителей на ограниченной территории, несмотря на подавление ГЛОНАСС.

Результаты исследований использованы при выполнении следующих НИОКР: составная часть (СЧ) опытно-конструкторской работы (ОКР) «Сантиметр»; СЧ ОКР «Создание навигационной аппаратуры с функцией определения пространственной ориентации» (шифр «Орт»)» 2013-2018 гг.; НИР «Исследования по созданию подсистемы синхронизации передатчиков наземной межвидовой системы высокоточной навигации» (шифр «Поддержка-19») 2019-2021 гг.

Внедрение результатов подтверждаются соответствующими актами.

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач использованы методы теории вероятностей и математической статистики, статистической теории радиотехнических систем, теории оптимальной фильтрации случайных процессов, имитационного компьютерного моделирования, вычислительной математики, программирования, анализа международных и федеральных законов, соглашений и постановлений.

Положения, выносимые на защиту

- а) Прореживание поднесущих OFDM сигнала позволяет увеличить потенциальную точность оценивания задержки огибающей для канала с многолучевым распространением и аддитивными белыми гауссовскими шумами.
- б) Разработанный метод приема многокомпонентных сигналов позволяет осуществить их прием с помощью нескольких радиочастотных трактов с полосой и частотой дискретизации, меньшими полосы этого сигнала.
- в) Введение новых сигналов ГЛОНАСС в частотном диапазоне С позволит создавать помехозащищенную НАП с линейными габаритами менее 5 см, включая антенну, и точностью навигационных определений не хуже современных образцов.

- г) В условиях дефицита вычислительных ресурсов увеличение области частот, занимаемой сигналом, приводит к уменьшению чувствительности и помехоустойчивости поиска: по 2 дБ на каждое удвоение интегральной полосы составляющих сигнала.
- д) Разделение навигационных данных на два потока, предсказуемый и непредсказуемый, с последующим их временным мультиплексированием, позволяет повысить чувствительность и помехоустойчивость когерентного слежения за информационным сигналом на 6 дБ; таким образом, добиться эффекта аналогичного введению пилот компоненты, но без усложнения коррелятора или увеличения числа его каналов.
- е) Расширенный фильтр Калмана с произвольной точкой разложения функции правдоподобия позволяет осуществлять синтез алгоритмов сигнальной обработки с ограничениями на опорный сигнал коррелятора.
- ж) Алгоритм фокусировки сигналов антенной решетки навигационного приемника на основе оценки разности их фаз позволяет снизить погрешность оценки параметров сигналов в отсутствие данных об ориентации, диаграммах направленности антенных элементов и задержках в радиочастотном тракте.
- и) Реализация многовходового коррелятора с модифицированными алгоритмами обработки позволяет сократить расход ресурсов цифровой логики в 2-5 раз в многоантенной НАП ГНСС с посткорреляционной обработкой: фокусировкой, режекцией многолучевости, определением ориентации.
- к) Комплексование угломерной НАП на базе систем слежения за разностью фаз с датчиками угловых скоростей позволяет повысить помехоустойчивость к действию заградительных помех на 8-10 дБ при размещении на объектах, динамично изменяющих ориентацию.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается корректностью постановки задач и использованных приближений, выбором и использовани-

ем апробированных математических моделей и методов теоретического анализа и обработки экспериментальных данных, согласием результатов теоретических расчетов с результатами компьютерного моделирования и экспериментальными данными, сравнением с результатами, опубликованными другими авторами и полученными на основе альтернативных расчетных и экспериментальных методов.

Результаты работы отражены в **публикациях**:

- а) 28 статьях в отраслевых журналах и сборниках трудов, из которых:
 - изданы в журналах перечня ВАК (без учета входящих в международные базы) — 15,
 - входят в международные базы Scopus и Web Of Science — 8,
 - изданы единолично — 6.
- б) 2 патентах РФ на изобретение,
- в) 2 патентах РФ на полезную модель,
- г) 5 свидетельствах о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Результаты работы докладывались и обсуждались на научных **конференциях** ION GNSS+ (Портленд, США, 2017 г), «Радионавигационные Технологии в Приборостроении» (Туапсе, 2018 г, 2021 г), MWENT (Москва, 2018), трех конференциях PIERS (Сингапур, 2017; Тойама, Япония, 2018; Рим, Италия, 2019) с присвоением за доклады премии Young Scientist Award в 2018 и 2019 годах.

Электронная версия работы, а также препринты статей, информация о свидетельствах Роспатента и т.п., доступны на странице автора: <http://www.srns.ru/wiki/Korogodin>.

Структура и объем работы

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы и решаемых задач, формулируется цель исследования, определяется научная новизна и практическая ценность результатов, вводятся основные используемые понятия,

определяется перечень задач, решение которых необходимо для достижения цели исследования.

В первой главе ...

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты работы.

Личный вклад автора

В решении части задач приняли участие ученики автора. Исследование метода и алгоритмов обработки сигнала по-частям с использованием нескольких каналов коррелятора проведено совместно со студенткой Михайловой О.К. Исследование метода двухпоточной модуляции навигационных сигналов данными сообщения проведено совместно со студентом Мутасовым Г.Р. Совместно с аспирантом Днепровым В.В. поставлены эксперименты по комплексированию угломерной НАП с датчиками угловых скоростей и исследовалась работа систем слежения за разностью фаз и многовходового коррелятора в различных приложениях.

Различная навигационная аппаратура, используемая в экспериментах, включая как аппаратную, так и программные части, разрабатывалась силами коллектива Лаборатории Навигационных Систем НИУ МЭИ, ведущим научным сотрудником которой является автор. В частности, логические модули многовходового коррелятора реализованы с.н.с. Липой И.В. Семизэлементарная антенная решетка и радиочастотный блок к ней, используемые в части экспериментов, разработаны и предоставлены филиалом АО «ОРКК» – «НИИ КП» в рамках проводимых совместных работ.

Вклад автора заключается в выполнении основного объема исследований. Основные результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Во всех работах, которые выполнены в соавторстве, соискатель непосредственно участвовал в постановке задач, разработке методов их решения, получении, обработке и анализе результатов исследований. Все экспериментальные результаты, вошедшие в диссертационную работу, получены совместно с соавторами работ, опубликованных по теме диссертации.

Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю — Перову Александру Ивановичу — за неоценимую помощь, вдохновение и создание благоприятной среды для развития автора как инженера и работника науки. Некоторые идеи, лежащие в основе работы, предложены Александром Ивановичем. Подходы к решению научных проблем и применяемый теоретический базис — плоды его воспитания.

Следует отметить заслуги коллектива филиала АО «ОРКК» — «НИИ КП» в апробации результатов диссертационного исследования и постановке перед автором практически важных и значимых задач.

Автор благодарит сотрудников УИЦ «Лаборатория Навигационных Систем» НИУ МЭИ за совместную работу, живое общение и поддержку. Спасибо научному сообществу в целом, преподавателям Радиотехнического факультета и кафедры Радиотехнических систем НИУ МЭИ в частности, за их работу и прививаемые ценности. Студентам МЭИ — за правильные вопросы.

Заранее благодарю оппонентов, рецензентов и просто интересующихся за затраченное время и усилия, внимание к работе.

1 Анализ факторов, ограничивающих точность навигационных определений

Глобальные навигационные системы созданы для предоставления потребителю сервиса: сервиса определения его местоположения и скорости, точной синхронизации и т.д. Но качество навигационного сервиса зависит от множества факторов: условий работы, решаемой потребителем задачи и, что особенно важно, используемого потребителем оборудования. Не существует «стандартной» навигационной аппаратуры потребителей (НАП), приемник строится разработчиками опираясь на интерфейсный контрольный документ (ИКД) и доступные технические средства для реализации обработки навигационных сигналов. Результат определяется решаемой НАП задачей (требованиями назначения), структурой навигационного сигнала и уровнем развития электронной техники.

В данной главе разрабатывается обобщенная модель навигационного сигнала ГНСС, обобщенная модель НАП и выделяются факторы, ограничивающие точность навигационных определений и помехоустойчивость этой НАП.

1.1 Техники позиционирования по сигналам ГНСС и задачи с их помощью решаемые

1.1.1 Техники позиционирования: SPP, DGNSS, RTK, PPP

В ходе развития спутниковой навигации появились несколько вариантов реализации псевдодальномерного метода. Отличаются они способом измерения задержки сигнала, требованиями к точности информации о положении маяков и тем, как описывается положение потребителя. Аналоги этих техник могут использоваться в ЛРНС.

1.1.1.1 Абсолютное позиционирование по кодовым измерениям: SPP

Техника позиционирования **SPP** (англ. single point positioning) – это прямая реализация описанного выше псевдодальномерного метода, где в качестве наблюдений псевдодальностей используется задержка огибающей сигнала.

1.1.1.1.1 А ещё у нас есть пункты

1.1.1.1.1.1 И подпункты. Да-да, так можно писать контракт, ТЗ или методику.

Почему именно огибающей? При формировании сигнала спутник производит преобразование собственной шкалы времени t^s в сигнал $S(t^s)$, используя одно и то же время и для огибающей, и для несущей:

$$S(t^s) = Ah(t^s) \cos(2\pi f_0 t^s) \quad (1.1)$$

Но в процессе распространения сигнал проходит среды и устройства, в которых фазовая и групповая скорости немного отличаются. Примером такой среды выступает ионосфера. При этом фаза огибающей и фаза несущей немного расходятся, как результат, наблюдаемое по несущей и по огибающей время отличается на несколько десятков наносекунд. Поэтому можно говорить про **кодовое** t^{cs} (то есть соответствующее огибающей) и **фазовое** (то есть соответствующее несущей) t^{ps} сигнальное время:

$$S(t_r) = Ah(t^{cs}) \cos(2\pi f_0 t^{ps}), \quad t^{cs} = t^{cs}(t_r), \quad t^{ps} = t^{ps}(t_r), \quad (1.2)$$

где t_r – время по часам приемника, в которых он и наблюдает принимаемый сигнал.

Прилагательное "кодовое" (англ. code) используется так как сигнал промоделирован специальным дальномерным кодом, во многом и определяющим функцию $h(t)$. Слово "фазовое" несколько неоднозначно, т.к. можно говорить и о фазе кода, и о фазе несущей. Но по-умолчанию под фазой понимают именно фазу несущего колебания, откуда и пошла практика соответствующие измерения называть фазовыми. В англоязычных текстах часто используется более корректное прилагательное "carrier-phase", например, carrier-phase measurements [48, стр. 8, 11].

Фазовое и кодовое сигнальные времена не только отличаются численно, но и их измерения принципиально отличаются свойствами. В радионавигации часто

проявляется такое свойство измерений, как их *неоднозначность*. В повседневной жизни мы тоже каждый день встречаемся с этим свойством, когда смотрим на простые часы: так мы можем узнать время дня, но не узнать день недели и текущую дату. Таким образом, мы получаем точное измерение времени, но с неоднозначностью в сутки. Аналогичный эффект возникает при наблюдении за сигналом:

- по огибающей можно узнать однозначное время, включая и год, и день, и секунду, и её долю, т.к. огибающая неперiodична;
- наблюдение за несущей дает время с очень маленьким шагом неоднозначности, в долю наносекунды, т.к. у функции $\cos(2\pi f_0 t)$ маленький период.

Использовать кодовые измерения для решения задачи, ввиду их однозначности, значительно проще, чем фазовые. Поэтому абсолютное позиционирование по кодовым измерениям реализуется в любом навигационном приемнике, а большинство из них этим подходом и ограничивается. Преимущества SPP: простота, надежность и автономность. Недостатком является относительная грубость, типичные ошибки позиционирования в этом режиме составляют 5-10 метров.

Другие техники позиционирования базируются на SPP, но используют дополнительные данные для увеличения точности.

1.1.1.2 Относительное позиционирование по кодовым измерениям: DGNSS

В технике **DGNSS** (differencial GNSS) для увеличения точности позиционирования приемник дополнительно использует кодовые измерения от одной или нескольких базовых станций, расположенных на удалении до нескольких десятков километров. При этом, как правило, данные передаются посредством дополнительного радиоканала или сигналов сотовой сети. В качестве *базовых станций* выступают специальные неподвижные ГНСС приемники с точно известными координатами.

Так как приемник находится недалеко от базовых станций, то он наблюдает тот же набор спутников, а ошибки его измерений и измерений базовой станции во многом совпадают. Составляется система уравнений, подобная (??), но для радиус-вектора, соединяющего базу и приемник (его в этом случае называют

ровером). При её решении общие ошибки измерений взаимно компенсируют друг друга, что позволяет определить радиус-вектор с точностью около 1 метра в случае расстояния до базы в несколько километров.

При удалении от базы корреляция ошибок измерений падает, поэтому погрешность позиционирования возрастает со скоростью около 2-6 см на каждые 10 км удаления [49; 50].

Так как в результате решения системы уравнений получают положение приемника относительно базы, то эту технику относят к классу относительных. Но так как координаты базы известны точно, то простым прибавлением измеренного радиус-вектора к ним получают абсолютное положение приемника.

Толчком к развитию DGNSS послужила работа режима селективного доступа (англ. SA, selective availability) на спутниках системы GPS до начала 2000 года. В этом режиме в транслируемые спутником эфемериды (информации о положении аппаратов) закладывались дополнительные ошибки, снижающие точность позиционирования до уровня 100 метров. В режиме SPP только авторизованные пользователи могли получить высокую точность, т.к. им предоставлялась модель этих искусственных смещений. Применение же дифференциального метода по своему принципу позволяло компенсировать ошибки в эфемеридах и получать точные оценки координат всем.

1.1.1.3 Относительное позиционирование по фазовым измерениям: RTK и PPK

Взаимная компенсация целого ряда ошибок измерений в дифференциальном режиме позволяет воспользоваться для определения местоположения не только кодовыми, но и фазовыми измерениями. Но для этого всё ещё надо *разрешить неоднозначность* фаз, например, с использованием LAMBDA метода [51].

Фазовые измерения на два порядка точнее кодовых, в результате, если выполняются все условия для получения решения, то его точность составляет около 1 сантиметра. Как и в случае кодовыми измерениями, удаление ровера от базы приводит к деградации точности, примерно на 1 мм на каждый километр увеличения расстояния.

В зависимости от времени получения навигационного решения выделяют Static, RTK и PPK режимы.

В режиме Static ровер оставляют неподвижным на несколько минут, накапливают измерения. Сами оценки координат получают с учетом неподвижности ровера и, как правило, уже после проведения сеансов измерений. Например, накопленные данные выгружаются в компьютер, имеющий доступ к данным базовой станции через Интернет, который уже и производит расчет положения.

В RTK и PPK режимах ровер может продолжать перемещения, режимы же отличаются моментом обработки измерений.

В режиме **PPK** (Post Processing Kinematic, позиционирование движущегося объекта в режиме пост-обработки) обработка измерений происходит после проведения сеанса измерений, но в этом режиме требования неподвижности ровера не предъявляются. Благодаря этому, PPK широко применяется на подвижных объектах, например, для проведения геодезических изысканий с помощью беспилотных летательных аппаратов. Пост-обработка измерений позволяет исключить прямой канал связи между приемником и базой, что упрощает реализацию.

В режиме **RTK** (Real Time Kinematic, позиционирование движущегося объекта в реальном времени) данные от базовой станции передаются роверу по некоторому каналу связи в момент снятия измерений, что позволяет сразу получить точное навигационное решение. Данный режим широко применяется при проведении наземных геодезических работ людьми, т.к. позволяет выявить возможные проблемы сразу в момент съемки и внести оперативные исправления.

1.1.1.4 Абсолютное позиционирование по фазовым измерениям: PPP

Группа методов PPP (англ. Precise Point Positioning) приближается к абсолютному позиционированию, т.к. в этом случае используются данные не ближайших базовых станций, а всемирной сети станций, например, IGS (англ. International GNSS Service). Корректирующая информация, созданная по данной такой сети, передается потребителю по спутниковому каналу связи или через Интернет, и позволяет ему определить свое местоположение с точностью около 1 см даже на удалении от базовых станций [52]. Недостатком метода является

его долгая сходимость, обычно до получения первого точного навигационного решения требуется подождать около десяти минут.

2 Глава про симуляцию: с картинками и табличками

2.1 Обобщенная модель навигационного сигнала ГНСС

2.1.1 В разделе тоже могут быть пункты

2.1.2 И ещё

2.1.2.1 И подпункты

2.1.3 Обратите внимание, что нумерация пунктов согласована с их положением в иерархии разделов

2.1.1 Модель традиционного BPSK сигнала

2.1.1.1 И в подразделе могут быть пункты!

2.1.1.2 И ещё

2.1.1.2.1 И подпункты

2.1.1.3 Обратите внимание, что нумерация пунктов согласована с их положением в иерархии разделов

Обратимся к опыту спутниковых навигационных систем. Они развиваются уже более полувека, пройдя через множество модификаций и смену поколений. Эволюция этих систем сопровождалась развитием используемых сигналов: от простых двухтоновых колебаний до многокомпонентных сигналов с криптографической защитой.

В широко используемых сигналах GPS L1C/A и ГЛОНАСС L1OF в качестве спектрорасширяющей последовательности используются дальномерные коды с периодом в 1 мс и длиной 1023 и 511 символов соответственно. Эти последовательности являются псевдослучайными (ПСП, англ. PRN), формируются с помощью линейных генераторов на сдвиговых регистрах (англ. LFSR). Модель таких сигналов проста (см. рис. 2.1):

$$S(t) = ACD \cos(2\pi f_0 t + \varphi), \quad (2.1)$$

где

- A – амплитуда сигнала, больше или равна нулю;
- $C = C(t)$ – модуляция дальномерным кодом, принимает значения $+1$ и -1 при значениях дальномерного кода 0 и 1 соответственно, смена значений происходит часто (2 мкс или менее);

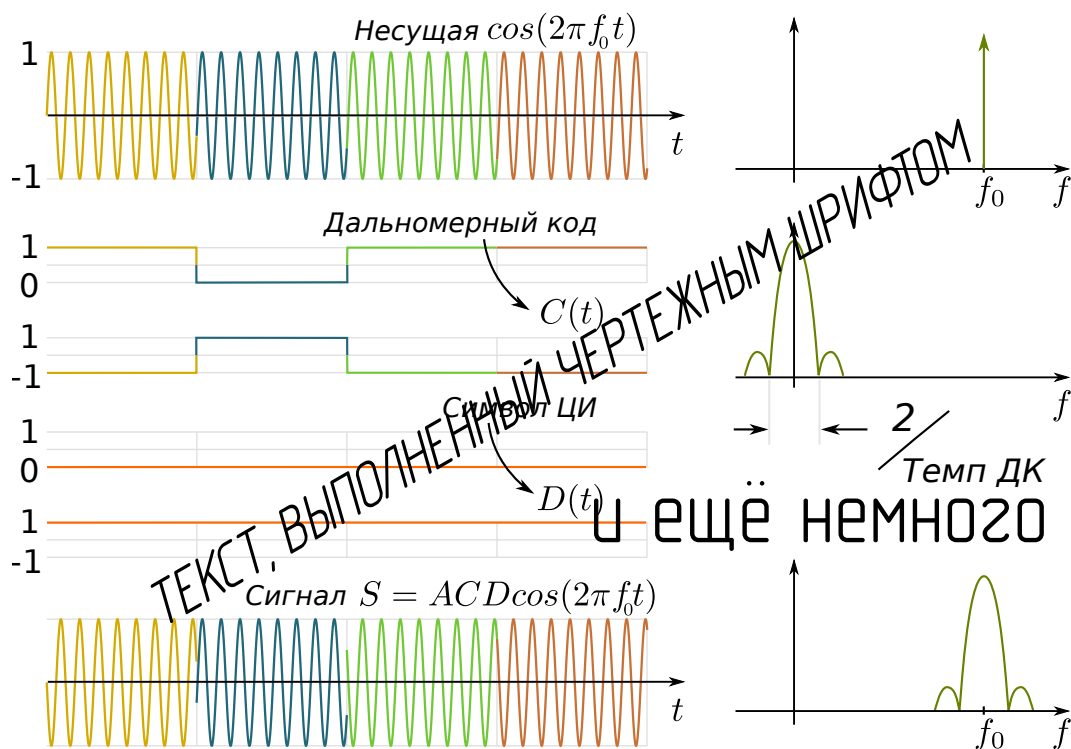


Рисунок 2.1 — Структура сигнала ГНСС с модуляцией дальномерным кодом и навигационным сообщением

- $D = D(t)$ – модуляция цифровой информацией, принимает значения $+1$ и -1 при значениях символа цифровой информации 0 и 1 соответственно, смена значений происходит редко (2 мс или более);
- f_0 – несущая частота, например, 1575.42 МГц для GPS L1C/A.

Например, для всех сигналов ГЛОНАСС L1OF, принимаемых большинством современных смартфонов, используется один и тот же дальномерный код, повторяющийся каждую **миллисекунду** из года в год (см. рис. 2.2).

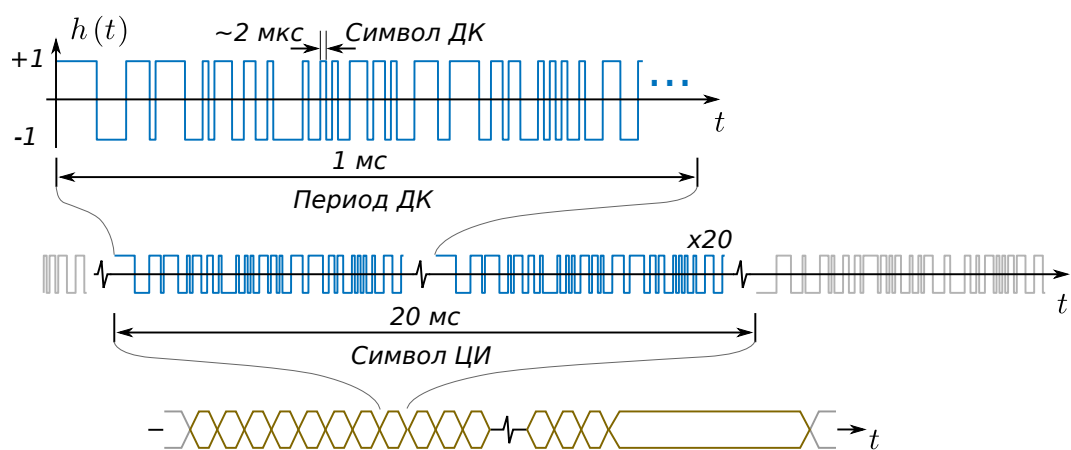


Рисунок 2.2 — Соотношение между темпом дальномерного кода и цифровой информацией на примере сигнала ГЛОНАСС L1OF

Заключение

Изложение итогов выполненного исследования, рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы

Ссылка ради ссылки [53]

Список литературы

1. *Betz J. W.* The Offset Carrier Modulation for GPS Modernization // Proceedings of the 1999 National Technical Meeting of The Institute of Navigation. — San Diego, CA, January 1999. — C. 639—648. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=716>.
2. *Betz J. W.* Overview of the GPS M code signal // The Mitre Corporation. — May 2000.
3. *Betz J. W.* Binary Offset Carrier modulations for radionavigation // Navigation. — 2001. — Т. 48(4). — C. 227—246.
4. *Betz J. W., Goldstein D. B.* Candidate Designs for an Additional Civil Signal in GPS Spectral Bands // Proceedings of the 2002 National Technical Meeting of The Institute of Navigation. — San Diego, CA, US, January 2002. — C. 622—631. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=256>.
5. *Betz J. W.* On the Power Spectral Density of GNSS Signals, with Applications // Proceedings of the 2010 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. — San Diego, CA, US, January 2010. — C. 859—871. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=8867>.
6. *Betz J. W.* Signal Structures for Satellite-Based Navigation: Past, Present, and Future // Proceedings of the ION 2013 Pacific PNT Meeting. — Honolulu, Hawaii, US, April 2013. — C. 131—137. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=10969>.
7. Introduction to the special issue on the BeiDou navigation system / J. W. Betz [и др.] // NAVIGATION. — 2019. — Т. 66, № 1. — C. 3—5. — DOI: <https://doi.org/10.1002/navi.293>. — eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/navi.293>. — URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/navi.293>.
8. SBAS L1/L5 Signal Design Options / M. Tran [и др.] // Proceedings of the 59th Annual Meeting of The Institute of Navigation and CIGTF 22nd Guidance Test Symposium (2003). — Albuquerque, NM, USA, June 2003. — C. 507—

517. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=3885>.
9. *Hegarty C., Betz J. W., Saidi A.* Binary Coded Symbol Modulations for GNSS // Proceedings of the 60th Annual Meeting of The Institute of Navigation (2004). — Dayton, OH, USA, June 7 - 9, 2004. — C. 56—64. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=5597>.
 10. Intersystem and Intrasystem Interference Analysis Methodology / B. Titus [и др.] // Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS/GNSS 2003). — Portland, OR, USA, September 2003. — C. 2061—2069. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=5391>.
 11. *Hegarty C.* Considerations for GPS Spectrum Interference Standards // Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2012). — Nashville, TN, USA, September 2012. — C. 2921—2929. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=10470>.
 12. *Dafesh P. A., Nguyen T. M., Lazar S.* Coherent Adaptive Subcarrier Modulation (CASM) for GPS Modernization // Proceedings of the 1999 National Technical Meeting of The Institute of Navigation). — San Diego, CA, USA, January 1999. — C. 649—660. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=717>.
 13. *Dafesh P., Cooper L., Partridge M.* Compatibility of the Interplex Modulation Method with C/A and P(Y) code Signals // Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2000). — Salt Lake City, UT, USA, September 2000. — C. 2122—2129. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=1629>.
 14. *Dafesh P., Cahn C.* Phase-Optimized Constant-Envelope Transmission (POCET) Modulation Method for GNSS Signals // Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2009). — Savannah, GA, USA, September 2009. —

- C. 2860—2866. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=8701>.
15. Receiver Compatibility of POCET Signal Combining / P. A. Dafesh [и др.] // Proceedings of the 2011 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. — San Diego, CA, USA, January 2011. — C. 1173—1180. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=9568>.
 16. MBOC: The New Optimized Spreading Modulation Recommended for GALILEO L1 OS and GPS L1C / G. W. Hein [и др.] // Proceedings of IEEE/ION PLANS 2006). — San Diego, CA, USA, April 2006. — C. 883—892. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=6727>.
 17. Exploration of Possible GNSS Signals in S-band / I. Mateu [и др.] // Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2009). — Savannah, GA, USA, September 2009. — C. 1573—1587. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=8565>.
 18. *Avila-Rodriguez J., Wallner S., Hein G.* How to Optimize GNSS Signals and Codes for Indoor Positioning // Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2006). — Fort Worth, TX, USA, September 2006. — C. 2418—2426. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=6766>.
 19. *Avila-Rodriguez, J.A. Pany T., Hein G.* Bounds on Signal Performance Regarding Multipath-estimating Discriminators // Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2006). — Fort Worth, TX, USA, September 2006. — C. 1710—1722. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=6767>.
 20. Galileo E1 OS and GPS L1C Pseudo Random Noise Codes - Requirements, Generation, Optimization and Comparison / S. Wallner [и др.] // Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The

- Institute of Navigation (ION GNSS 2007). — Fort Worth, TX, USA, September 2007. — C. 1549—1563. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=7359>.
21. A Vision on New Frequencies, Signals and Concepts for Future GNSS Systems / J.-A. Avila-Rodriguez [и др.] // Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2007). — Fort Worth, TX, USA, September 2007. — C. 517—534. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=7550>.
 22. The MBOC Modulation: The Final Touch to the Galileo Frequency and Signal Plan / J.-A. AVILA-RODRIGUEZ [и др.] // NAVIGATION. — 2008. — Т. 55, № 1. — C. 15—28. — DOI: <https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.2008.tb00415.x>. — eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/j.2161-4296.2008.tb00415.x>. — URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/j.2161-4296.2008.tb00415.x>.
 23. Study on a Galileo Signal and Service Plan for C-band / J.-A. Avila-Rodriguez [и др.] // Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008). — Savannah, GA, USA, September 2008. — C. 2515—2529. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=8155>.
 24. Assessment on the use of C-Band for GNSS within the European GNSS Evolution Programme / A. Schmitz-Peiffer [и др.] // Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008). — Savannah, GA, USA, September 2008. — C. 2189—2198. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=8121>.
 25. Pratt A. A New Class of Spreading Codes Exhibiting Low Cross-Correlation Properties // Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2002). — Portland, OR, USA, September 2002. — C. 1554—1564. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=2167>.

26. *Pratt A., Owen J.* Signal Multiplex Techniques in Satellite Channel Availability Possible Applications to Galileo // Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2005). — Long Beach, CA, USA, September 2005. — C. 2448—2460. — URL: %7Bhttps://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=6452%7D.
27. *Yao, Z. and Lu, M.* Side-peaks Cancellation Analytic Design Framework with Applications in BOC Signals Unambiguous Processing // Proceedings of the 2011 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. — San Diego, California, USA, January 2011. — C. 775—785. — URL: %7Bhttps://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=9523%7D.
28. *Yao, Zheng and Lu, Mingquan.* Optimized Modulation for Compass B1-C Signal with Multiple Processing Modes // Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2011). — Portland, OR, USA, September 2011. — C. 1234—1242. — URL: %7Bhttps://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=9681%7D.
29. Implementation of Constant Envelope Multiplexing Based on Extended Interplex and Inter-Modulation Construction Method / Zhang, X.M. and Zhang, X. and Yao, Z. and Lu, M. // Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2012). — Nashville, TN, September 2012. — C. 893—900. — URL: %7Bhttps://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=10302%7D.
30. *Yao, Zheng and Lu, Mingquan.* Constant Envelope Combination for Components on Different Carrier Frequencies with Unequal Power Allocation // Proceedings of the 2013 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. — San Diego, California, USA, January 2013. — C. 629—637. — URL: %7Bhttps://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=10838%7D.
31. *Zhang, J. and Yao, Z. and Lu, M.* Applications and Low-complexity Implementation of ACE-BOC Multiplexing // Proceedings of the 2014 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. — San Diego,

- California, January 2014. — C. 781—791. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=11552>.
32. Performance Comparison of Existing Dual-frequency Constant-Envelope Modulations / Guo, Fu and Yao, Zheng and Lu, Mingquan and Zhou, Hengwei // Proceedings of the 2016 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. — Monterey, California, USA, January 2016. — C. 948—955. — DOI: <https://doi.org/10.33012/2016.13396>. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=13396>.
 33. Comparative Analysis of Dual-Frequency Constant Envelop Multiplexing Techniques for ARNS Band / Zhu, Y. and Yao, Z. and Cui, X. and Lu, M. // Proceedings of the 2014 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. — San Diego, California, January 2014. — C. 792—801. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=11553>.
 34. *Guo, Fu and Yao, Zheng and Lu, Mingquan*. Orthogonality-based Constant Envelope Multiplexing // Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014). — Tampa, Florida, USA, September 2014. — C. 3163—3173. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=12398>.
 35. The Ziv-Zakai Bound for Time-Of-Arrival Estimation of New Generation GNSS Signals / Z. Liu [и др.] // Proceedings of the 2016 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. — Monterey, California, USA, January 2016. — C. 639—646. — DOI: <https://doi.org/10.33012/2016.13402>. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=13402>.
 36. On the Inherent Tracking Error Caused by CEM and Imperfect Spreading Code of GNSS Signal / Zhang, Jiayi and Yao, Zheng and Shen, Jun and Lu, Mingquan // Proceedings of the 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016). — Portland, Oregon, September 2016. — C. 2808—2815. — DOI: <https://doi.org/10.33012/2016.13402>.

- 33012/2016.14807. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=14807>.
37. *Zhou, Hengwei and Yao, Zheng and Lu, Mingquan.* A Quasi-Coherent Receiving Algorithm and its Performance Verification for Composite Signals of Next Generation GNSS // Proceedings of the 2016 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. — Monterey, California, January 2016. — C. 591—599. — DOI: <https://doi.org/10.33012/2016.13438>. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=13438>.
 38. Multicarrier Constant Envelope Composite Signal - A Solution to the Next Generation Satellite Navigation Signals / Yao, Zheng and Ma, Junjie and Zhang, Jiayi and Lu, Mingquan // Proceedings of the 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017). — Portland, Oregon, September 2017. — C. 1520—1533. — DOI: <https://doi.org/10.33012/2017.15372>. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=15372>.
 39. Overview of BDS III new signals / M. Lu [и др.] // NAVIGATION. — 2019. — Т. 66, № 1. — C. 19—35. — DOI: <https://doi.org/10.1002/navi.296>. — eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/navi.296>. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=102798>.
 40. *Wang T., Yao Z., Lu M.* Mesh topology based clock synchronization technique for pseudolite systems // NAVIGATION. — 2020. — Т. 67, № 3. — C. 619—632. — DOI: <https://doi.org/10.1002/navi.383>. — eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/navi.383>. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=102874>.
 41. Study of Signal Combining Methodologies for GPS III Flexible Navigation Payload / G. H. Wang [и др.] // Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2004). — Long Beach, CA, USA, September 2004. — C. 2207—2218. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=5904>.

42. The RF Compatibility of Flexible Navigation Signal Combining Methods / T. Fan [и др.] // Proceedings of the 2005 National Technical Meeting of The Institute of Navigation. — San Diego, CA, USA, January 2005. — С. 810—818. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=6046>.
43. Study of Signal Combining Methodologies for Future GPS Flexible Navigation Payload (Part II) / T. Fan [и др.] // Proceedings of IEEE/ION PLANS 2008. — Monterey, CA, USA, May 2008. — С. 1079—1089. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=7919>.
44. BOC Power Spectrum Densities / E. Rebeyrol [и др.] // Proceedings of the 2005 National Technical Meeting of The Institute of Navigation). — San Diego, CA, USA, January 2005. — С. 769—778. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=6042>.
45. Interplex Modulation for Navigation Systems at the L1 Band / E. Rebeyrol [и др.] // Proceedings of the 2006 National Technical Meeting of The Institute of Navigation). — Monterey, CA, USA, January 2006. — С. 100—111. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=6514>.
46. Phase Noise in GNSS Transmission/Reception System / E. Rebeyrol [и др.] // Proceedings of the 2006 National Technical Meeting of The Institute of Navigation). — Monterey, CA, USA, January 2006. — С. 698—708. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=6574>.
47. Signal Distortions at GNSS Payload Level / E. Rebeyrol [и др.] // Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2006). — Fort Worth, TX, USA, September 2006. — С. 1595—1605. — URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=6850>.
48. *Gurtner W., Estey L.* RINEX The Receiver Independent Exchange Format Version 3.03, Update 1 : тех. отч. / International GNSS Service. — 31 January.2018.

49. 2001 Federal Radionavigation Plan / Department of Transportation and Department of Defense, USA. — 2001. — 03.2002. — URL: %7Bhttps://www.navcen.uscg.gov/pdf/frp/frp2001/FRP2001.pdf%7D.
50. *Monteiro L. S., Moore T., Hill C.* What is the accuracy of DGPS? // The Journal of Navigation. — 2005. — № 58. — С. 207—225.
51. *Teunissen P.* Least-squares estimation of the integer GPS ambiguities // Invited Lecture, Section IV Theory and Methodology, IAG General Meeting. — Beijing, China, 1993. — URL: %7Bhttps://www.researchgate.net/publication/243675603_Least-Squares_Estimation_of_the_Integer_GPS_Ambiguities%7D.
52. Multi-Frequency Precise Point Positioning Using GPS and Galileo Data with Smoothed Ionospheric Corrections / F. Basile [и др.] // Proceedings of PLANS 2018, the Institute of Electrical and Electronics Engineers / Institute of Navigation Position, Location and Navigation Symposium. — Monterey, California, 04.2018. — С. 1388—1398. — DOI: 10.1109/PLANS.2018.8373531. — URL: https://www.gpsworld.com/innovation-multi-frequency-precise-point-positioning-using-gps-and-galileo.
53. *Перов А. И., Харисов В. Н.* ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. — изд. 4-е, перераб. и доп. — М.: Радиотехника, 2010.

Примечание. Какое-нибудь примечание.

Таблица А.1 — Перечень оборудования, задействованного в стенде на рис. А.1

№	Обозначение	Тип и характеристики
1	ПРМ	Приемник навигационных сигналов ГНСС заданных типов
2	ИС	Имитатор навигационных сигналов, R&S SMBV100B с не менее чем 32 каналами имитации (опции SMBVB-K136, SMBVB-K137), опциями формирования сигналов ГНСС SMBVB-K44, SMBVB-K62, SMBVB-K66, SMBVB-K94, SMBVB-K98, SMBVB-K107, опциями частотных диапазонов SMBVB-K134, SMBVB-K135.
3	Д	Радиочастотный сумматор-делитель мощности MiniCircuits ZAPD-2DC-S+
4	АС	Анализатор спектра R&S FSV
5	ИП	Лабораторный источник питания R&S HAMEG HMP4040
6	ПК	Персональный компьютер: <ul style="list-style-type: none">– процессор семейства Intel Core i3 и выше;– от 8 Гб оперативной памяти;– наличие интерфейса Ethernet;– ОС Linux Kubuntu версии от 16.04;– ПО Matlab, python версии 3 и выше.
7	КОМ	Коммутатор (switch) Ethernet 100 Мбит/с, минимум 4 порта
8	-	Кабельные сборки из состава Комплекта кабелей испытуемого образца (отмечены синим)

... продолжение таблицы А.1

№	Обозначение	Тип и характеристики
9	-	Дополнительные кабельные сборки и адаптеры: радиочастотных, питания, цифровых интерфейсов (отмечены красным, адаптеры могут применяться к синим)
10	-	Табличка может быть очень длинной, с переносом на следующую страницу