**Введение**

Спутниковая навигация – одна из самых динамично развивающихся областей прикладной космонавтики. Задача нахождения своего местоположения всегда волновала человечество, прежде всего потому, что передвижение по земному шару становилось все проще и быстрее и немало способствовало укреплению межгосударственных и торговых связей. Эра радио открыла перед человеком большие возможности в этом направлении. В настоящее время аппаратура спутниковых радионавигационных систем (СРНС) становится все более распространенной, находит своего пользователя не только в военном секторе и в стратегических государственных объектах, например, системах воздушного и морского сообщения, но и среди простых потребителей, которые решают бытовые задачи, требующие возможности ориентирования в пространстве. Существующая аппаратура позволяет решать и более сложные задачи. К настоящему времени для их решения и с учетом соответствующих требований разработано множество различных типов навигационной аппаратуры потребителей (НАП).

Основными требованиями, предъявляемыми к НАП, являются: точностные характеристики, надежность и оперативность получаемых навигационных данных.

Точностные характеристики в первую очередь определяют точность определения координат и составляющих вектора скорости потребителя. Требуемая точность позиционирования варьируется в зависимости от области применения. Так, например, заход на посадку воздушных судов требует точности нескольких метров к определяемым плоскостным координатам и высоте. Чуть большие погрешности допускаются при маневрировании в портах для морских судов.

Под надежностью здесь подразумевается доступность (готовность) навигационных данных.

Под оперативностью понимается время получения первого определения местоположения и время восстановления синхронизации после потери слежения за сигналом навигационного космического аппарата (НКА).

Возрастающие требования к вышеуказанным параметрам приводят к увеличению сложности НАП и ее функциональных возможностей, в частности, для улучшения характеристик функционирования НАП используется вариант одновременной работы по сигналам всех видимых НКА различных СРНС (ГЛОНАСС, GPS и др.) в их различных частотных диапазонах.

Время первого определения, как важная характеристика оперативности НАП, складывается из длительности следующих этапов функционирования НАП:

* поиска, обнаружения сигнала и первичной оценки его радионавигационных параметров (РНП);
* вхождения в слежение по измеряемым РНП,
* приема символьной информации;
* аналогичных этапов для обработки сигналов еще как минимум 3 НКА;
* обработки полученной информации и вычисления местоположения по сигналам 4 НКА, если это возможно (при условии, что получен приемлемый геометрический фактор - величина, определяемая взаимным геометрическим положением НКА из рабочего созвездия и характеризующая влияние погрешности измерения РНП на погрешность определения местоположения).

Настоящая работа посвящена исследованию способов сокращения длительности первого этапа обработки сигнала каждого НКА - непосредственного поиска и обнаружения сигнала. Сокращение длительности этого этапа приводит к сокращению времени первого определения. Последняя характеристика становится все более важной с увеличением числа сигналов НКА, которые нужно обнаружить для использования при решении навигационной задачи. В настоящее время работа по двум СРНС одновременно становится все более распространенной. В этом случае приемник должен находить сигналы как минимум от 5 НКА, а для достижения лучшего геометрического фактора - и больше. Также имеется тенденция к приему сигналов всех НКА, находящихся в поле видимости потребителя. В случае, когда потребителю не известны никакие априорные сведения о видимых НКА и собственном местоположении, поиск сигнала нужно проводить в достаточно большой области неопределенности по задержке и частоте. Можно также отметить, что длительность других этапов функционирования НАП плохо поддается сокращению. Например, длительность этапа приема символьной информации состоит из двух стадий: строчной синхронизации - ожидании момента прихода метки времени, и собственно приема соответствующего объема информации в течение фиксированного интервала времени ее передачи. Момент прихода метки времени является случайной величиной, и с равной вероятностью может принимать любое значение в пределах ее периода, составляющего 2 секунды (для СРНС ГЛОНАСС) и 6 секунд (для СРНС GPS).

Необходимость сокращения времени первого определения обусловлена следующими причинами. Во-первых, это возросшая мобильность пользователей СРНС, а, следовательно, и возросшие требования к оперативности. Возможность быстрого определения своего местоположения в любое время особенно важна для представителей тех профессий, которые решают жизненно важные задачи, например, сотрудники МЧС. Во-вторых, уменьшение времени первого определения необходимо при внештатных ситуациях различных видов, например, при запуске резервной НАП при отказе основной. В-третьих, малое время определения может быть немаловажным фактором для решения различных задач в военном секторе.

Учитывая все вышеперечисленное, можно сказать, что проблема сокращения времени первого определения является достаточно актуальной.

**1 ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МНП КН**

**1.1 Общие сведения**

При проектировании алгоритмов обработки сигналов в модуле навигационного приемника космического назначения должны учитываться ряд существенных отличий в условиях приема сигнала, по сравнению с условиями приема сигнала наземным потребителем.

Одним из таких отличий, например, может служить разница в динамике наземного потребителя и бортовой аппаратуры спутниковой навигации (БАСН). В случае оценки взаимной динамики, которая определяет диапазон изменения доплеровского смещения частоты, наземного потребителя и навигационного космического аппарата, вклад последнего будет на порядок больше, по сравнению с вкладом, вносимым наземным потребителем. Однако, если рассматривать приемный модуль, который непосредственно находится в космическом пространстве, то значительный вклад во взаимную динамику вносит движение самого потребителя., что влечет к увеличению его скорости и, соответственно, доплеровского смещения частоты.

Помимо этого, важную роль играет расположение потребителя относительно орбиты навигационного космического аппарата. В зависимости от местоположения БАСН существенно меняются условия геометрической видимости спутников радионавигационных систем, длительность радиовидимости, а также уровень мощности на входе приемной антенны потребителя.

**1.2. Классификация орбит**

Орбиты искусственных спутников Земли по геометрического характеру движения делят на представленные основный типы:

* круговые или близкие к круговым;
* слабо эллиптические;
* высокоэллиптические.

Спутники, летающие на круговых или близких к круговым орбитам, по критерию высоты полета, можно разделить на 3 типа:

* низкоорбитальные спутники (НОС);
* среднеорбитальные спутники;
* высокоорбитальные спутники (ВОС).

Высота орбит, на которых летают низкоорбитальные спутники, лежит в пределах от 200 до 1500 км. Вращаются спутники вокруг Земли с периодом около 2-х часов. Скорость движения — до десяти километров в секунду. Примерами низкоорбитальных спутников являются пилотируемые космические корабли, спутниковые связные системы и искусственные спутники для дистанционного зондирования Земли.

Среднеорбитальные же спутники характеризуются высотой в диапазоне от 1500 до 36 000 км, период обращения же составляет порядка 4-20 часов, а скорости изменяются вплоть до нескольких единиц километров в секунду. Хорошими примерами среднеорбитальных космических аппаратов могу служить спутники систем ГЛОНАСС, GPS, GALILEO и BEIDOU.

Движение высокоорбитальных спутников осуществляется на высоте выше 36 000 км, период вращения составляет более 20 часов, а скорости достигают единиц километров в секунду.

**1.3 Взаимная динамика потребителя и навигационного КА**

Диапазон поиска сигнала по частоте и параметры следящих петель определяются величиной доплеровского смещения частоты, которое возникает в связи с взаимным движением аппаратуры потребителя и навигационного космического аппарата. В случае, если потребитель находится на Земле, доплеровский сдвиг частоты в основном определяется динамикой движения НКА и лежит в пределах от -5 кГц до +5 кГц. В случае же для потребителя, находящегося на орбите, максимально допустимые значения доплеровского смещения частоты зависит от типа и высоты орбиты.

Доплеровская частота прямо пропорциональна несущей частоте сигнала и радиальной скорости сближения потребителя и НКА:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

где – доплеровское смещение частоты, – радиальная скорость сближения потребителя и НКА, – номинальное значение несущей частоты сигнала, – скорость света.

**1.5 Что-то на всякий случай про радстойкость**

**2 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛОВ ГНСС**

**2.1 Сигналы ГНСС ГЛОНАСС**

Российская глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС) обеспечивает высокоточное и непрерывное определение времени, координат местоположения потребителя, а также вектора скорости движения объектов в любой точке земного шара и околоземного пространства. На данный момент система ГЛОНАСС состоит из обширного количества комплексов:

* Космический комплекс системы ГЛОНАСС, в состав которой входят: орбитальная группировка, средства выведения и наземный комплекс управления;
* Функциональные дополнения, включая широкозонную систему функционирования дополнения ГНСС — систему дифференциальных коррекций и мониторинга, а также региональные и локальные системы мониторинга и дифференциальной навигации;
* Система высокоточной апостериорной эфемеридно-временной информации;
* Средства основного обеспечения ГЛОНАСС — системы оперативного определения параметров ориентации и вращения Земли, системы формирования государственной шкалы всемирного скоординированного времени, геодезической основы Российской Федерации;
* Навигационная аппаратура потребителей.

Сигналы, излучаемые спутниками системы ГЛОНАСС, по номиналу несущей частоты можно разделить на 2 типа: L1 (1.6 ГГц) и L2 (1.25 ГГц). Помимо частотного разделения, сигналы можно классифицировать по точностным характеристикам: сигналы стандартной и высокой точности. Сигналы стандартной точности доступны для всех потребителей, у которых имеется соответствующая аппаратура, и которые находятся в зоне видимости спутников системы ГЛОНАСС.

Рисунок 2.1 — Космические аппараты системы ГЛОНАСС

В виду постоянно растущих требований потребителей, данная система постоянно совершенствуется. На ранних этапах в системе присутствовали лишь сигналы с частотным разделением (FDMA), однако позднее добавили и сигналы с кодовым разделением (CDMA). В таблице 2.1 представлены характеристики космический аппаратов системы ГЛОНАСС. На рисунке 2.1 представлены эти же космические аппараты в том же порядке.

Таблица 2.1. Характеристики КА системы ГЛОНАСС

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Характеристики | **«ГЛОНАСС»** | **«ГЛОНАСС-М»** | **«ГЛОНАСС-К»** | **«ГЛОНАСС-К2»** |
| Количество КА | 8 | | | |
| Количество КА в каждой плоскости | 8 | | | |
| Суточная нестабильность БСУ | 5∙10-13 | 1∙10-13 | 1∙10-13 | 1∙10-14 |
| Тип сигналов | FDMA | FDMA и CDMA | FDMA и CDMA | FDMA и CDMA |
| Сигналы стандартной точности | L1OF | L1OF, L2OF, L3OC | L1OF, L2OF, L3OC, L2OC | L1OF, L2OF, L1OC, L2OC, L3OC |
| Сигналы высокой точности | L1SF, L2SF | L1SF, L2SF | L1SF, L2SF, L2SC | L1SF, L2SF, L1SC, L2SC |

**2.1.1 Сигналы с частотным разделением L1OF, L2OF**

Навигационный сигнал, излучаемый каждым штатным спутником, представляет из себя многокомпонентный фазоманипулированный шумоподобный сигнал. Данный сигнал различается несущими частотами L1 и L2. Помимо этого, за счет использования технологии FDMA, сигналы образуют частотную сетку, которая рассчитывается по следующим формулам[ИКД ГЛОНАСС]:

|  |  |
| --- | --- |
| *,* |  |
| , |  | |

где *К* — номера несущих частот, излучаемые в соответствующих частотных диапазонах L1 и L2; *fL1* = 1602 МГц, *dfL1* = 562.5 кГц — для диапазона L1; *fL2* = 1246 МГц, *dfL2* = 437.5 кГц — для диапазона L2. Номер *К* отвечает за номер сигнала (литеру) и может принимать значения от -7 до 6.

Частотная сетка по номерам *К*, соответствующая формулам 2 и 3, приведена в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Частотная сетка сигналов ГЛОНАСС L1OF и L2OF

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Номер частоты | Номинал частоты L1, МГц | Номер частоты | Номинал частоты L2, МГц |
| 06 | 1605.3750 | 06 | 1248.6250 |
| 05 | 1604.8125 | 05 | 1248.1875 |
| 04 | 1604.2500 | 04 | 1247.7500 |
| 03 | 1603.6875 | 03 | 1247.3125 |
| 02 | 1603.1250 | 02 | 1246.8750 |
| 01 | 1602.5625 | 01 | 1246.4375 |
| 00 | 1602.0000 | 00 | 1246.0000 |
| -01 | 1601.4375 | -01 | 1245.5625 |
| -02 | 1600.8750 | -02 | 1245.1250 |
| -03 | 1600.3125 | -03 | 1244.6875 |
| -04 | 1599.7500 | -04 | 1244.2500 |
| -05 | 1599.1875 | -05 | 1243.8125 |
| -06 | 1598.6250 | -06 | 1243.3750 |
| -07 | 1598.0625 | -07 | 1242.9375 |

В сигналах L1OF и L2OF используется фазовая модуляция на 180 градусов и модулируется двоичной последовательностью, которая образована суммированием по модулю два тремя двоичными компонентами:

* Псевдослучайный дальномерный код, скорость которого 511 кбит/с;
* Навигационное сообщение со скоростью передачи данных 50 бит/с;
* Вспомогательное меандровое колебание, передаваемого со скоростью 100 бит/с.

Псевдослучайный дальномерный код представляет из себя псевдослучайную последовательность (ПСП) максимальной длины регистра сдвига (М-последовательность) с периодом *T = 1 мс*, которая образована порождающим полиномом *1 + x5 + x9*, снимаемую с 7-го разряда 9-разрядного регистра сдвига.

Навигационное сообщение представляет собой поток цифровой информации, которая дополнительно закодирована кодом Хэмминга и преобразована в относительный код. Передаваемое навигационное сообщение служит для проведения потребителями навигационных определений, привязки к точному времени и для планирования сеансов навигации. Структура потока цифровой информации представляется в виде непрерывно повторяющихся суперкадров. Каждый суперкадр содержит 5 кадров длительностью 2.5 минуты, каждый их которых в свою очередь состоит из 15 строк длительность 30 секунд. Каждый суперкадр передает полный объем неоперативной информации (альманах) для всех 24 НКА системы ГЛОНАСС. Структура суперкадра представлена на рисунке 2.2.

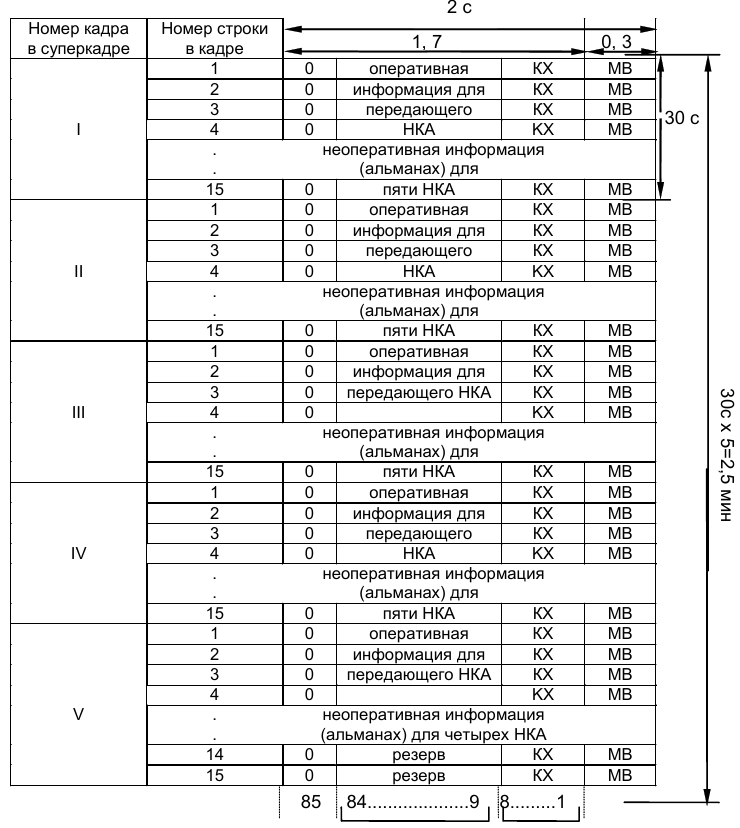
Строка цифровой информации, длительность которой 2 с, в своем составе содержит 85 двоичных символов длительностью по 20 мс, которые передаются в относительном коде.

Рисунок 2.2 — Структура суперкарда навигационного сообщения ГЛОНАСС

Помимо цифровой информации (ЦИ) в строке также содержится метка времени, которая занимает 0.3 секунды длительности. Метка времени представляет из себя укороченную псевдослучайную последовательность, состоящая из 30 двоичных символов длительностью 10 мс каждый. Вместе с ЦИ и МВ в строке передаются 8 проверочных символов кода Хэмминга, благодаря которым производится проверка строки на достоверность. На рисунке 2.3 представлена структура информационной строки системы ГЛОНАСС.

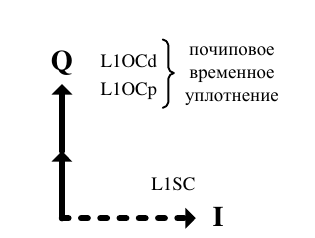
 Рисунок 2.3 — Структура информационной строки

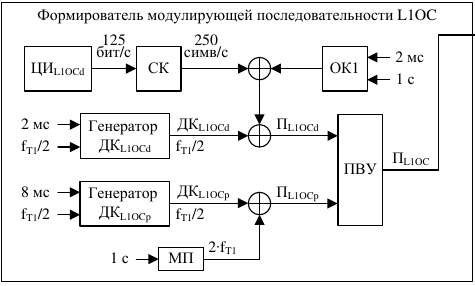
**2.1.2 Сигнал ГЛОНАСС с кодовым разделением L1OC**

Перспективный сигнал ГЛОНАСС с кодовым разделением L1OC излучается на несущей частоте *fL1* = 1600,995МГц и состоит из двух компонент равной мощности: информационной L1OCd и пилотной L1OCp. Две эти компоненты уплотнены путем чередования чипов дальномерных кодов этих компонент, так называемое почиповое временное уплотнение (мультиплексирование). Также сигнал L1OC квадратурно уплотнен с сигналом L1SC (закрытый сигнал высокой точности), фаза L1OC опережает фазу L1SC на 90 градусов, что соответствует квадратуре *Q.* Структура, описывающая данное уплотнение, представлена на рисунке 2.4.

Сигнал L1OCd модулируется двоичной последовательностью (рисунок 2.5), которая образована суммированием по модулю два тремя двоичными компонентами:

* Дальномерный код, генерируемый с частотой 511.5 кГц;
* Оверлейный код;
* Сверточный код длительностью 4 мс (250 симв/с).

Рисунок 2.4 — Структура сигала L1OC

Рисунок 2.5 — Формирователь модулирующей последовательности L1OC

Пилот-сигнал L1OCp представляет собой сумму по модулю 2 дальномерного кода с тактовой частотой 511.5 кГц и меандровой последовательностью (МП), тактовая частота которой равна 2.046 МГц. Меандровая последовательность синхронизирована с символами дальномерного кода, передается старшими разрядами вперед и представляет из себя периодическую последовательность 0101. За счет наличия МП, спектр компоненты L1OCp имеет вид BOC(1,1).

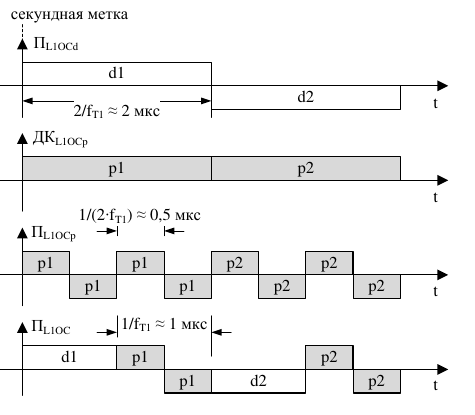
Итоговый сигнал L1OC получается после почипового временного уплотнения (ПВУ) компоненты с данным (L1OCd) и пилот-сигнала (L1OCp). Временные соотношения и способ формирования сигнала ГЛОНАСС с кодовым разделением приведен на рисунке 2.6.

Рисунок 2.6 — Временные соотношения сигнала L1OC

Дальномерные коды компоненты с данными представляют из себя коды Голда с периодом *T=2 мс* и длиной *N=1023.* Итоговый код является суммой по модулю два двух двоичных цифровых автоматов ЦА1 и ЦА2, полиномы которых соответственно равны *1 + x7 + x10* и *1 + x3 + x7+x9 + x10.*

Дальномерный код пилот-сигнала представляет собой усеченную последовательность Касами с длинной *N=4092* и периодом *T=8 мс*. ДК также получается с помощью суммирования по модулю 2 двух двоичных последовательностей цифровых автоматов ЦА1 и ЦА2. Полиномы данных ЦА имеют вид *1 + x6 + x8 + x11 + x12* и *1 + x + x6* соотвественно.

Навигационное сообщение L1OCd передается со скоростью 125 бит/с и состоит из двухсекундных строк по 250 бит. В отличие от сигналов ГЛОНАСС с частотным разделением, кодовые сигналы не имеют заранее определенной постоянной структуры.

**2.1.3 Сигнал ГЛОНАСС с кодовым разделением L2OC**

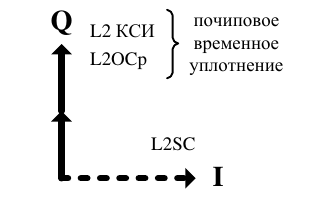
CDMA сигнал L2OCp излучается на частоте, номинальное значение которой равно 1248.06 МГц, и уплотнен сигналом канала служебной информации L2 КСИ с помощью чередования чипов дальномерного кода этих двух сигналов. Итоговый сигнал квадратурно уплотняют с сигналом L2SC, что демонстрируется на рисунке 2.7.

Рисунок 2.7 — структура сигнала L2OC

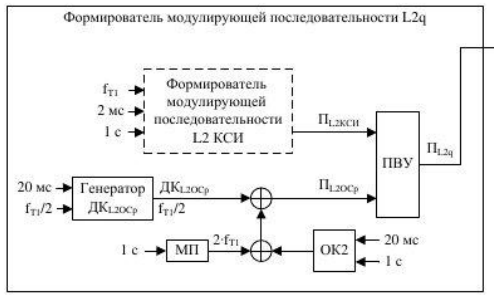
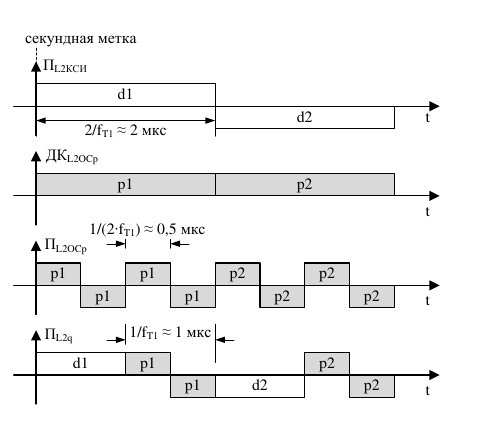
Пилот-сигнал L1OCp представляет из себя сумму по модулю два трех двоичных последовательностей: дальномерного кода, имеющий тактовую частоту 511.5 кГц, оверлелейного кода длительности 20 мс и меандровой последовательности (МП), тактовая частота которой составялет 2.046 МГц. Меандровая последовательность служит для формирования модуляции типа BOC(1,1). Структура формирования сигнала представлена на рисунке 2.8.

Рисунок 2.8 — Формирователь сигнала L2OC

Итоговый сигнал L2OC получается после почипового временного уплотнения (ПВУ) компоненты L2 КСИ и пилот-сигнала (L2OCp). Временные соотношения и способ формирования сигнала ГЛОНАСС с кодовым разделением приведен на рисунке 2.9.

Дальномерный код пилот-сигнала представляет собой усеченную последовательность Касами с длинной *N=10230* и периодом *T=20 мс*. ДК также получается с помощью суммирования по модулю 2 двух двоичных последовательностей цифровых автоматов ЦА1 и ЦА2, тактовая частота которых равна 511.5 кГц.

Рисунок 2.9 — Временные соотношения сигнала L2OC

**2.2 Сигналы ГНСС GPS**

Global Positioning System (GPS) начала разрабатываться еще с 1973 года, когда в Управление совместных программ, которое было в составе Центра космических и ракетный исследований США, пришел запрос от Министерства обороны США разработать, развернуть и испытать навигационную систему космического базирования. Итогом разработки стала система NAVSTAR (NAVigation System with Time And Ranging), из названия которой следует, что она предназначена для решения двух задача — навигации (определения мгновенного положения и скорости потребителя) и синхронизации шкал времени. Ввиду того, что заказчиком было Министерство обороны США, первоочередными задачами ставились задачи национальной безопасности и обороны. Спустя 5 лет, в 1978 году был запущен первый космический аппарат Block I.

В истории создания системы GPS выделяют два этапа развертывания: фаза первоначальной работоспособности (IOC) и фазу полной работоспособности (FOC). На момент развертывания первого этапа в состав орбитальной группировки входило 24 космических аппаратов модификаций Block I/II/IIA, которые были полностью работоспособны. Второй же этап начался в 1995 году после завершения летных испытаний.

Изначально планировалось, что точность системы GPS C/A-кода будет в пределах 400 метров. Однако, реальная точность оказалась на порядок больше, и составила 15-40 метров по координатам и доли метров в секунду по скорости. Из-за столь высоких показателей точности, власти США посчитали, что системой могут воспользоваться потенциальные противники, в том числе в военной отрасли. В итоге было принято решение о преднамеренном загрублении точности для гражданских потребителей. Данный режим продлился до 2 мая 2000 года.

В нынешний этап модернизации системы GPS заложена разработка и производство космических аппаратов следующего третьего поколения Block III, которые в сочетании с улучшенным наземным комплексом управления и навигационной аппаратурой потребителей обеспечат более точные, доступные и помехозащищенные характеристики.

На данный момент система GPS предоставляет 2 вида услуг:

* услуги стандартного позиционирования, доступную для всех;
* услуги точного позиционирования, доступную для санкционированных пользователей.

В спутниковой радионавигационной системе GPS используется кодовое разделение сигналов (CDMA), из чего следует, что все сигналы со всех спутников передаются на одной несущей частоте. Представленные сигналы имеет либо модуляцию вида BPSK, либо BOC(m, n).

В таблице 2.3 представлены характеристики навигационных радиосигналов системы GPS.

Таблица 2.3 Характеристики навигационных сигналов системы GPS

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Диапазон | Несущая частота, МГц | Сигнал | Длительность кода ПСП, символы | Тактовая частота, МГц | Вид модуляции |
| L1 | 1575.42 | C/A  P  M  L1Cd  L1 Cp | 1023  ~7 дней  Нет данных  10230  1023∙1800 | 1.023  10.23  5.115  1.023  1.023 | BPSK  BPSK  BOC(10,5)  BOC(1,1)  TMBOC(6,1,1/11) |
| L2 | 1227.60 | P L2C  M | ~7 дней  М: 10230  L: 767250  Нет данных | 10.23  1.023  5.115 | BPSK  BPSK  BOC(10,5) |
| L5 | 1176.45 | L5I  L5Q | 10230∙10  10230∙20 | 10.23  10.23 | BPSK  BPSK |

**2.2.1 Открытый сигнал GPS L1 C/A**

Сигнал GPS L1 C/A является открытым сигналом, к которому может получить доступ любая навигационная аппаратура. Передается на несущей частоте 1575.42 МГц.

Дальномерный код сигнала GPS L1 C/A представляет собой код Голда длинной 1023 элемента, длительность которого составляет 1 мс. Данный код получается путем суммирования по модулю два двух псевдослучайных последовательностей, которые генерируются регистрами сдвига с линейными обратными связями, полиномы которых имеют вид *1 + x3 + x10* и *1 + x2 + x3 + x6+ x8+ x9+ x10*.

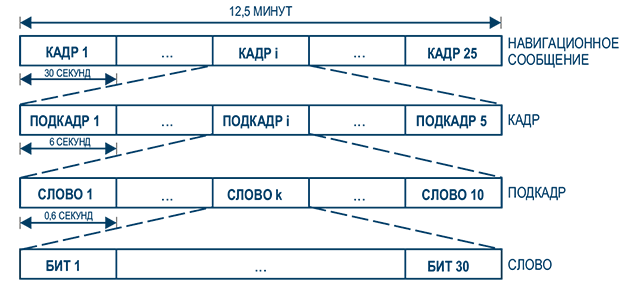
Цифровая информация передается кадрами, емкость которых составляет 1500 бит с длительностью в 30 секунд. Один такой кадр делится на подкадры (строки) длительностью 6 секунд. В свою очередь каждый подкадр содержит 10 слов по 30 бит каждое. Итоговый суперкадр образуется из 25 кадров и имеет длительность, равную 12.5 минутам. Структура цифровой информации сигнала GPS L1 C/A представлена на рисунке 2.10.

Рисунок 2.10 — Структура ЦИ сигнала GPS L1 C/A

**2.3 Сигналы ГНСС GALILEO**

Глобальная навигационная спутниковая система GALILEO создается Европейским Союзом для обеспечения независимости стран членов в сфере координатно-временного и навигационного обеспечения.

Европейский совет потребовал от Европейской комиссии в 1994 предпринять действия по разработке и развитию информационных технологий, в списке которых также была спутниковая навигация. С этого года программа по созданию европейской ГНСС была официально утверждена. Также были приняты два пути развития системы: создание системы, дополняющая функционал существующих ГНСС GPS и ГЛОНАСС; второе направление уже было направлено на создание своей собственной ГНСС, которая могла бы найти применение как в гражданском сегменте, так в государственно-частном партнерстве.

28 декабря 2005 и 27 апреля 2008 года на орбиту были запущены первые экспериментальные спутники GIOVE-A и GIOVE-B соответственно. Спутники GIOVE-A выполняли задачу оценки точностных характеристик навигационных радиосигналов GALILEO во всех частотных диапазонах. Спутники GIOVE-B выполняли задачу тестирования навигационной полезной нагрузки.

Первые космические аппараты непосредственно системы GALILEO были запущены 20 октября 2011 года. Далее, в декабре того же года спутники передали на Землю первый навигационный сигнал L - диапазона. Принятый сигнал соответствовал всем требованиями и спецификациям, помимо этого он был совместим с системой GPS.

Полностью система GALILEO была введена в эксплуатацию Европейской комиссией в 2016 году. Для пользователей она была доступна в режиме «начальной эксплуатационной производительности». Для круглосуточного глобального покрытия на первых этапах данные компенсировались некоторыми данными спутников американской системы GPS.

В феврале 2017 года была получена информация о том, что сигналы системы GALILEO недостаточно защищены от хакерских атак. Чтобы избавиться от данной проблемы было принято решение установить систему проверки подлинности электронных подписей на космические аппараты. Помимо установки данной системы на спутники, данный инструмент должен быть установлен на навигационную аппаратуру пользователей.

В отличие от систем GPS и ГЛОНАСС, система GALILEO не контролируется военными ведомствами, но в 2008 году парламентом Европейского Союза была принята резолюция, допускающая использование системы для проведения военных действий в рамках безопасности политики европейский стран.

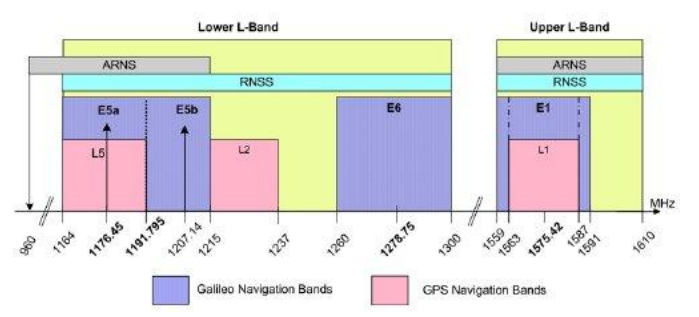
Глобальная навигационная спутниковая система GALILEO в полностью развернутой группировке должна обеспечить работу трех режимов навигационного обслуживания и предоставит следующие виды навигационных услуг:

* Открытая услуга (Open Service) — сигналы открытого типа, доступный всем потребителям без какой-либо абонентской платы;
* Коммерческая услуга (Commercial Service) — доступ к двум дополнительным сигналам зашифрованного типа, которые обладают повышенной скоростью передачи данных и навигационной точностью;
* Услуга с регулируемым государственным доступом (Public regulated Service) — дополнительные два сигнала для регламентированных пользователей (сигналы зашифрованным дальномерными кодами).

В последние годы все больше производителей навигационной аппаратуры начинают внедрять в свое оборудование возможность принимать и обрабатывать сигналы системы GALILEO. Такому растущему спросу способствует договоренность о совместимости и взаимодополнении с системой GPS третьего поколения. Характеристики навигационных сигналов представлены в таблице 2.4, а частотных план проиллюстрирован на рисунке 2.11.

Таблица 2.4 Характеристики навигационных сигналов GALILEO

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Диапазон | Несущая чатота, МГц | Сигнал | Длительность кода, символы | Тактовая частота, МГц | Модуляция |
| E1 | 1575.42 | E1-B  E1-C | 4092  4092 | 1.023  40.92 | CBOC |
| E5 | 1191.79 | E5a-I  E5a-Q  E5b-I  E5b-Q | 10230  10230  10230  10230 | 10.23  10.23  10.23  10.23 | AltBOC(15,10) |

Рисунок 2.11 — Частотный план системы GALILEO

**2.3.1 Открытый кодовый сигнал E1**

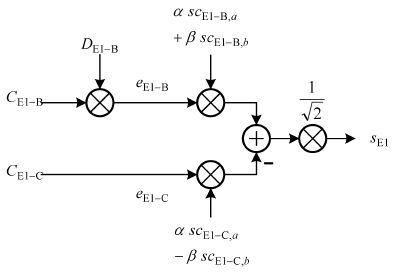
Сигнал GALILEO с кодовым разделением E1 излучается в L1 диапазоне со значением номинальной частоты 1575.42 МГц. В своем составе содержит две компоненты: информационную (E1-B) и пилотную (E1-C) компоненты с модуляцией типа CBOC (модуляция с составной двоичной смещенной несущей). В сигналах с CBOC модуляцией широкополосный сигнал BOC(6,1) суммируется с узкополосным сигналом BOC(1,1), в следствии чего минимизируется влияние многолучевого распространения. Описанный способ модуляции иллюстрируется на рисунке 2.12.

Рисунок 2.12 — Схема модуляции сигнала E1

Параметры, использующиеся на рисунке, описаны в таблице 2.5.

Таблица 2.5 Параметры модуляции CBOC

|  |  |
| --- | --- |
| Параметр | Описание |
| CE1-X | Бинарный дальномерный код |
| DE1-B | Бинарное навигационное сообщение |
| SCE1-X, Y | Бинарная поднесущая |
| α, β | Параметры, определяющие мощность поднесущих |

Навигационное сообщение DE1-B имеет скорость передачи данных 250 бит/с. Это сообщение объединяется с дальномерным кодом CE1-X, скорость и длина которого составляет 1.023 Мбит/с и 4092 бит соответственно.

Для сигнала GALILEO E1 дальномерный код представляет из себя многоуровневую кодовую конструкцию (tiered ranging code), использующая вторичный код (secondary code) для манипуляции первичного кода (primary code), в соответствии с рисунком 2.13.

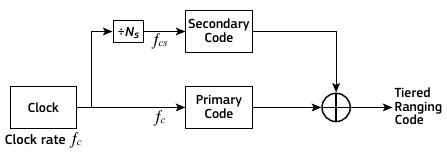
Цифровая информация передается кадрами, емкость которых составляет 90000 бит с длительностью в 720 секунд. Один такой кадр делится на подкадры длительностью 30 секунд. В свою очередь каждый подкадр содержит 15 страниц по 250 бит, длительность которых составляет 2 секунды. Структура цифровой информации сигнала GALILEO E1 представлена на рисунке 2.14.

Рисунок 2.13 — Схема генерации дальномерного кода CE1-X

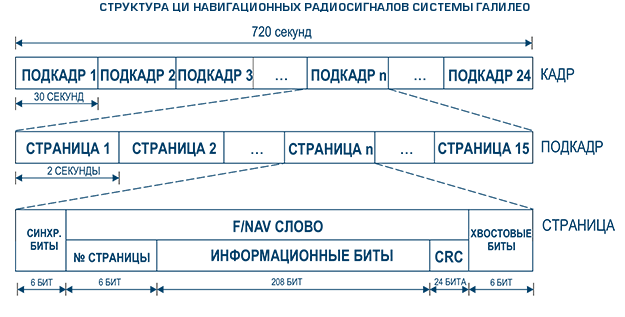


Рисунок 2.14 — Структура ЦИ навигационного сигнала GALILEO E1

**2.4 Сигналы ГНСС BEIDOU**

В 1983 году была предложена идея создания китайской навигационной спутниковой системы. В основу этой идеи легла концепция использования двух геостационарных космических аппарата, которые в 1989 году прошли экспериментальные проверки. Развитие ГНСС BEIDOU можно разделить на три этапа.

Первый этап был начат в 1994 году, спустя 6 лет были запущены 2 геостационарных спутника Beidou-1A и Beidou-1B. Данные спутники были построена на базе связной геостационарной платформы DFH-3. Конец первого этапа ознаменовался выводом на орбиту еще одного — третьего КА Beidou-1C в 2003.

Второй этап начался в 2004 году с развитием системы Beidou-2, и продолжился вплоть до 2012 года. В течение данного этапа было запущено 14 спутников: 4 спутника на средних орбитах, 5 спутников на наклонной геосинхронной орбите и 5 геостационарных спутника. Запуск такого количества спутников послужил окончанию процесса развертывания орбитальной группировки.

Развитие системы третьего поколения Beidou-3 ознаменовало начало третьего этапа, который был начат в 2009 году. Основной целью является доступ ко все основным видам услуг для пользователей, которые располагаются на территории как сухопутного Шелкового пути, так и водного. Итоговая орбитальная группировка должна будет содержать 35 космических аппаратов.

В 2015 году были запущены космические аппараты нового поколения, в которых произошли изменения структуру навигационного сигнала B1С, а именно, номинальную частоту несущей было принято сдвинуть до частот систем GPS L1 и Galileo E1, а также был изменен вид модуляции с QPSK на BOC. Данные изменение были направлены на взаимодополняемость системы Beidou с системами GPS и Galileo. Информация о характеристиках сигналов ГНСС Beidou представлена в таблице 2.6.

Таблица 2.6 Характеристики сигналов системы Beidou

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Диапазон | Несущая чатота, МГц | Сигнал | Длительность кода, символы | Тактовая частота, МГц | Модуляция |
| B1 | 1561.098 | B1-CD  B1-Cp  B1D  B1P | 2046 | 1.023  1.023  2.046  2.046 | BPSK  BPSK  BOC(14,2) |
| B2 | 1207.140 | B2aD  B2aP | 2046 | 10.23  10.23 | AltBOC(15,10) |

**2.4.1 Сигнал с кодовым разделением B1I**

Сигнал системы Beidou с кодовым разделением B1I передается на несущей частоте с номиналом 1561.098 МГц. Излучаемый сигнал передается с использованием квадратурной фазовой модуляцией (QPSK).

Дальномерный код сигнала B1I является укороченным кодом Голда с длительностью, равной 2046 чипов. Данный код получается путем суммирования по модулю два двух двоичным последовательностей, которые образуются на основе двух порождающий полиномов *1 + x + x7 + x8+ x9+ x10+ x11* и *1 + x + x2 + x3+ x4+ x5+ x8+ x9+ x11*.

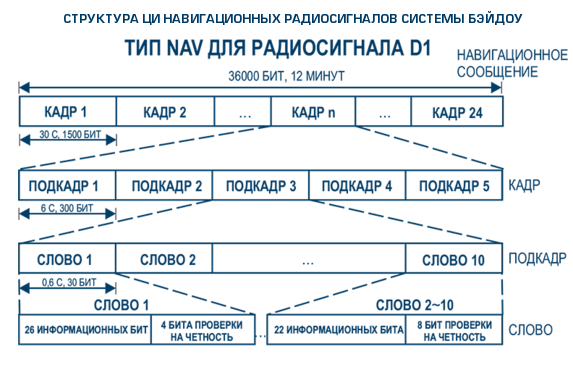
Цифровая информация передается кадрами, емкость которых составляет 1500 бит с длительностью в 30 секунд. Один такой кадр делится на подкадры длительностью 6 секунд. В свою очередь каждый подкадр содержит 10 слов по 30 бит, длительность которых составляет 0.6 секунд. Структура цифровой информации сигнала Beidou B1 представлена на рисунке 2.15.

Рисунок 2.15 — Структура ЦИ сигналов системы Beidou

**3 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБРАБОТКЕ И ПОИСКЕ СИГНАЛОВ ГНСС В НАП**

**3.1 Принципы обработки сигналов**

Задача навигационной аппаратуры потребителя — определить искомые радионавигационные параметры (РНП) и обработка этих параметров с помощью различных алгоритмов. В приведенных в пункте 2 навигационных системах используется псевдодальномерный и радиально-скоростной методы определения радионавигационных параметров. Использование псевдодальномерного метода позволяет позволяет найти время распространение сигнала (задержку дальномерного кода) и, как следствие, расстояние до спутника, излучающего сигнал. Радиально-скоростной метод позволяет найти смещение несущей частоты сигнала, возникающее из-за эффекта Доплера, благодаря чему появляется возможность определить скорость объекта.

Согласно теории об оптимальном приеме сигнала можно выделить 2 основных способа осуществить прием сигнала: корреляционный (использование коррелятора с опорным сигналом) и фильтрационный (использование согласованного фильтра). Структурное представление представленных способов изображено на рисунке 3.1.

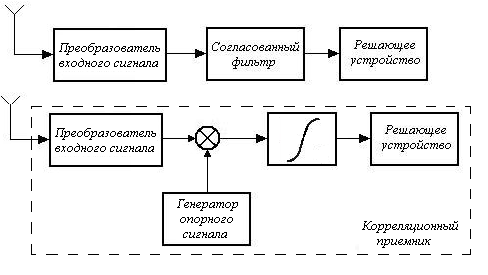


Рисунок 3.1 — Фильтрационный и корреляционный методы приема сигнала

В блок преобразования входного сигнала могут входить следующие элементы:

* блок преобразования частоты сигнала, который осуществляет перенос частоты сигнала на промежуточную с помощью использования гетеродинов
* аналаго-цифровой преобразователь, с помощью которого происходит дискретизация и квантование входного сигнала.

На входы антенны поступает сигнал одной из спутниковой глобальной навигационной системы, который можно представить в следующем виде:

|  |  |
| --- | --- |
| n(t), |  |

где — амплитуда сигнала, — цифровая информация, — дальномерный код, — временная задержка дальномерного кода, — несущая частота сигнала, — доплеровский сдвиг частоты, — начальная фаза несущей.

В представленной сигнале присутствуют неизвестные параметры, а именно: цифровая информация, задержка дальномерного кода, доплеровский сдвиг частоты и начальная фаза несущей. Из-за наличия последнего неизвестного параметра, который в свою очередь является не информативным, корреляционный приемник строят на базе схемы квадратурной обработки. Схема такого приемника представлена на рисунке 3.2.

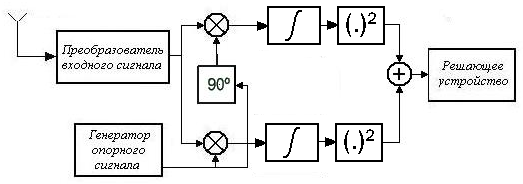


Рисунок 3.2 — Схема квадратурного приемника

Представленный корреляционный приемник в своем составе имеет два канала, в каждом из которых присутствует свой коррелятор, которые объединяются в квадратуре. Каждый канал состоит из перемножающего устройства с опорным сигналом и сумматором (интегратором). На каждый из перемножителей поступаем опорное колебания, однако на одном из каналов фаза опорного сигнала сдвинута на 90 градусов. Опорные сигналы представляют собой точные копии принимаемого сигнала. После перемножение осуществляется накопление на некотором интервале времени. В итоге, на выходе каждого канала получаются корреляционные интегралы, сумма которых отражают меру схожести принятого сигнала с опорным. Далее полученная оценка поступает на решающее устройство, в котором происходит сравнение с заранее выставленным значение. После чего делается вывод о наличии, если мера оказалась больше выставленного значения, или отсутствии сигнала, если мера оказалась меньше сигнала.

Сигнал на входе антенны представляет собой аддитивную смесь полезного сигнала и шума, из-за наличия которого происходит искажение сигнала и усложнение их обработки. Поэтому оптимальные алгоритмы, реализуемые в устройствах поиска, строятся на основе методов статистической теории принятия решений. Такие методы условно можно поделить на два типа. Первый тип — обнаружитель с фиксированным временем накопления. Данный метод основывается на определенном критерии обнаружения, например, критерий Неймана-Пирсона — фиксируется вероятности ложной тревоги и максимизируется вероятность правильного обнаружения сигнала. Второй тип основывается на уменьшении времени обработки сигнала, который реализуется с помощью последовательного обнаружителя с переменным временем накопления (обнаружитель Вальда).

**3.2 Область неопределенности РНП**

Координаты и вектор скорости движения потребителя являются необходимыми параметрами, которые нужно измерить. РНП являются изменяющимися во времени параметрами, из-за взаимного движения потребителя и навигационного космического аппарата. Поэтому их измерение выполняется с помощью использования следящих систем как по задержке, так и по частоте. Для ввода в слежение требуется знание РНП с точностью, которая определяется областью захвата соответствующей следящей системы. Обычно эта область захвата гораздо меньше области неопределенности РНП.

Неопределенность радионавигационных параметров возникает из-за нескольких причин:

* Априорная неизвестность задержки дальномерного кода, которая необходима для получения расстояния между НКА и потребителем;
* Взаимное перемещение потребителя и НКА, за счет чего появляется неопределенность в частотной области.

Для устранения неопределенности нужно найти корреляционные интегралы на всех позициях как по частоте, так и по задержке. Из чего можно сделать вывод, что в данном случае имеется двумерная область неопределенности, ограниченная некоторыми значениями ΔF по частоте и ΔT по задержке. Далее вся область неопределенности делится на более мелкие зоны неопределенность с соответственным шагом по частоте и задержке Δτ и Δf. Общее число элементарных ячеек, для которых нужно посчитать корреляционные интегралы, определяется выражением:

|  |  |
| --- | --- |
| , |  |

Область поиска изображена на рисунке 3.3

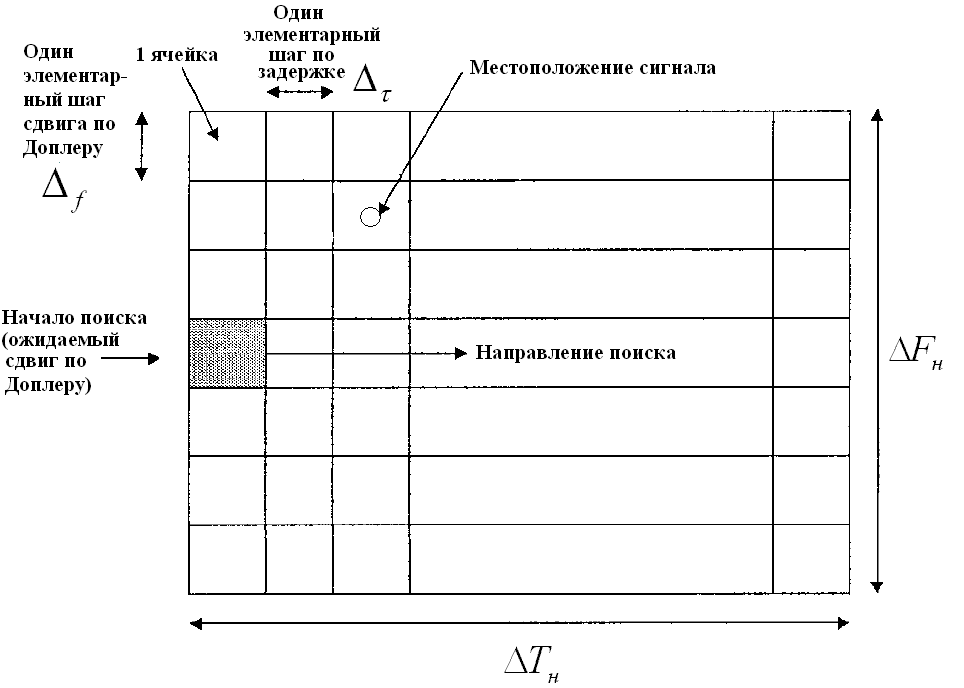


Рисунок 3.3 — Область поиска сигнала

Процедуру поиска неизвестных РНП можно разделить на 2 шага:

* Сканирование всей области неопределенности путем перебора значения по задержке и частоте с определенным выбранным шагом. Значения выставляются в опорный сигнал;
* Процедура обнаружения сигнала, реализуемая в каждой зоне поиска.

Наличие сигнала в пределах одной элементарной ячейки поиска подразумевает, что между принимаемым и опорным сигналом с выставленными параметрами по задержке и частоте наблюдается сильная корреляция. В противном случае, если корреляции нет или она незначительна, делается вывод о том, что радионавигационные параметры принимаемого и опорного сигналов отличаются более, чем на размер элементарной ячейки. После чего делается вывод о том, что в данной ячейке сигнал отсутствует и в ней находится только шум.

**3.3 Размеры элементарной ячейки**

Время поиска сигнала зависит от размеров области поиска, величины элементарной ячейки и времени ее анализа. Размеры области поиска (число элементарных ячеек) определяются априорными данными потребителя о его местоположении и возможной динамики. Выражение для решающей статистики, на основе которой принимается решение об отсутствии или наличии сигнала на входе порогового устройства при условии совпадения задержек входного и опорного сигналов имеет вид:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

где — время когерентного накопления, который в данной работе полагается равным 1 мс, — доплеровский сдвиг частоты.

Из приведенного выражения можно сделать вывод о том, что решающая статистика пропорциональна функции синуса Котельникова и определяет уровень корреляции принимаемого сигнала и опорного в частотной области при анализе элементарной ячейки. Также можно отметить, что данное выражение представляет из себя энергетическую оценку принимаемой аддитивной смеси полезного сигнала и шума.

Семейство характеристик, соответствующих выражению 6 представлено на рисунке 3.4, шаг поиска при этом выбран равным 500 Гц.

Центральный график соответствует случаю, когда в анализируемой ячейке поиска частота в опорном сигнале совпадает с частотой принимаемого сигнала. Пара смежных боковых графиков соответствует случаю, когда частота в опорной и принимаемом сигналах отличается на один шаг поиска по частотной области. Максимально допустимые энергетические потери можно определить по провалам в точке пересечения смежных графиков. Для выбранного случая с шагом 500 Гц величина потерь составляет 0.91 дБ

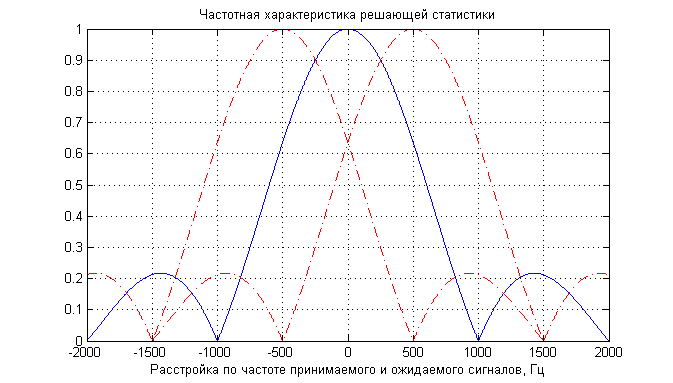


Рисунок 3.4 — Частотные характеристики решающей статистики

Выбор шага обусловлен следующими соображениями:

* Если шаг по частоте будет больше, то повысится вероятность пропуска сигнала из-за энергетических потерь, или даже в случае обнаружения сигнала при большой расстройке система слежения не сможет захватить сигнал;
* Если шаг по частоте будет меньше, то это увеличит число вероятных позиций по частоте и замедлит поиск сигнала, хотя и понизит вероятность пропуска сигнала.

Чтобы определить шаг поиска по задержке воспользуемся корреляционной функцией дальномерного кода принимаемого сигнала во временной области при нулевой расстройки по частоте.

Семейство графиков корреляционной функции представлено на рисунке 3.5. Здесь показаны три смежных по задержке ячейки поиска, которые сдвинуты по задержке на 0.5 символа дальномерного кода. В данном случае рассуждения аналогичны рассмотренным для ячейки в частотной области.

Рассуждая аналогичным образом, как и при выборе величины шага сканирования по частоте, можно отметить, что корреляционные свойства дальномерного кода используются тем лучше, чем меньше шаг сканирования по задержке кода. При шаге поиска по задержке в 0.5 символа кода энергетические потери составляют 2.5 дБ.

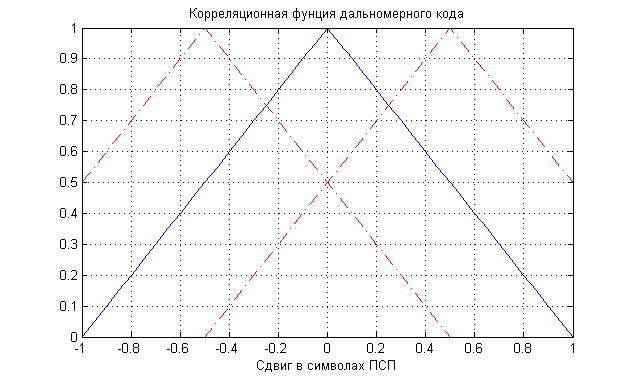


Рисунок 3.5 — Семейство корреляционных функция дальномерного кода

**3.4 Блок быстрого поиска**

В процессе поиска сигнала необходимо осуществить расчет корреляционного интеграла во множестве точек, а именно, их количество измеряется тысячами. Использование последовательного поиска в одном канале коррелятора приводит к тому, что время поиска может оказаться очень длительным, вплоть до нескольких минут. В виду этого процесс поиска распараллеливают, благодаря нескольким каналов одновременно.

В АО КБ «НАВИС» используется 4 блока быстрого поиска (ББП), каждый из которых способен проверить до 1024 позиций по задержке на одной частотной позиции. Данный ББП позволяет ускорить процесс поиска сигналов в 4096 раз по сравнению с одноканальным последовательным поиском.

**4 ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСКОРЕНИЯ ПОИСКА**

**4.1 Распределение доплеровского смещения частоты сигналов СРНС**

Для получения распределения доплеровского смещения частоты был использован специальный имитатор сигналов СРНС. С помощью данного имитаторы был воспроизведен полет навигационной аппаратуры потребителя на высоте НКО 200 км. Частотные распределения были получены для четырех СРНС: ГЛОНАСС, GPS, Galileo и Beidou, и представлены на рисунках 4.1 — 4.4.

На приведенных графиках видно, что распределения сильно отличаются от равномерного вида, кроме системы GPS. Из этого можно сделать вывод о том, что можно оптимизировать процедуру перебора значений частоты в схеме поиска сигнала. Перебор следует начинать не с нулевой позиции по частоте, а с той частоты, которая более вероятна для той или иной системы.

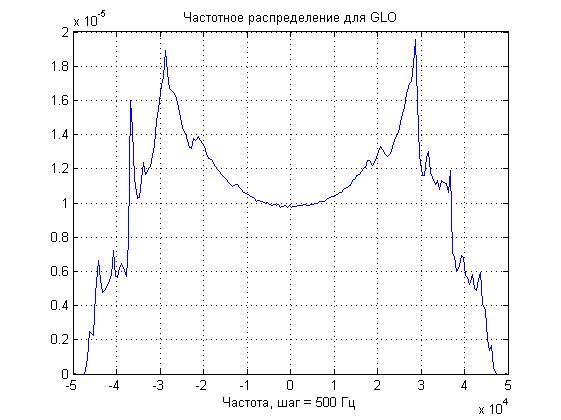
****

Рисунок 4.1 — Частотное распределение системы ГЛОНАСС

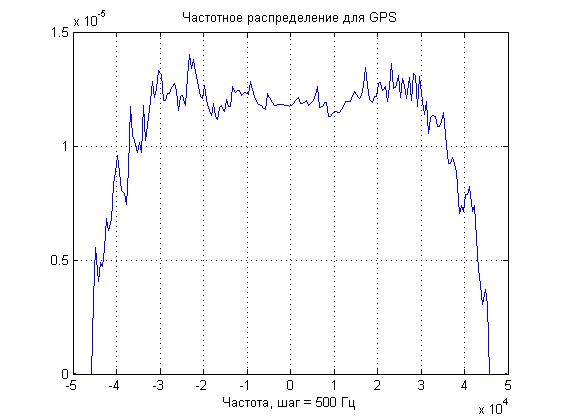
****

Рисунок 4.2 — Частотное распределение системы GPS

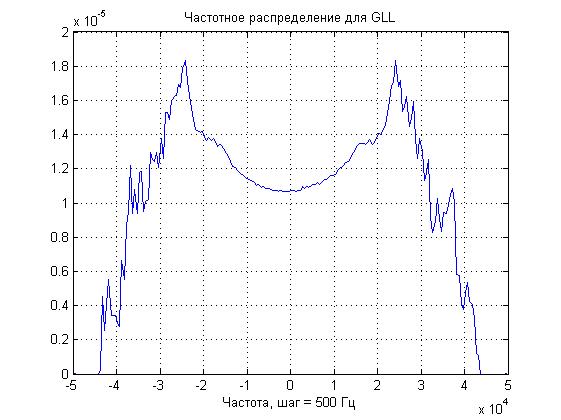


Рисунок 4.3 — Частотное распределение системы Galileo

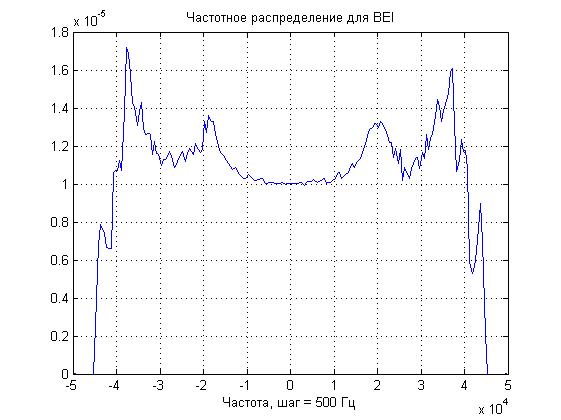


Рисунок 4.4 — Частотное распределение системы Beidou

**4.2 Время первого определения**

Основными требованиями, предъявляемыми к НАП, являются:

* точностные характеристики,
* надежность,
* оперативность получаемых параметров движения.

Под оперативностью понимается время получения первого определения местоположения и время восстановления синхронизации после потери слежения за сигналом навигационного космического аппарата (НКА).

Время первого определения НАП, складывается из длительности следующих этапов функционирования НАП:

* продолжительность анализа частотно-временной области;
* время синхронизации со строковой информацией;
* время, затраченное на прием необходимого количества строк, содержащих оперативную информацию, необходимую, для решения навигационных задач.

При холодном старте МНП используются два варианта поиска:

* прямой поиск сигналов;
* поиск сигналов по опоре.

При прямом поиске сигнала осуществляется анализ заданной широкой частотно-временной области средствами ускоренного поиска (блоками быстрого поиска (ББП)). Проверка обнаруженного кандидата осуществляется средствами одного канала корреляционной обработки (ККО) на одной частотной позиции в узком диапазоне по задержке.

При поиске по опоре используются средства одного ККО. Он анализирует узкую частотно-временную область, заданную по результатам обнаружения другого сигнала данного НКА.

**4.3 Характеристики сигналов ГНСС, влияющие на продолжительность поиска**

При холодном старте неизвестны все видимые НКА, поэтому в худшем случае нужно искать сигналы всех НКА ГНСС. Сведения о составе орбитальных группировок разных ГНСС представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Параметры орбитальных группировок ГНСС

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ГНСС | Количество плоскостей | Количество НКА в каждой плоскости | | Количество НКА в ГНСС | Высота орбиты, км | Угол наклонения, град |
|  |  | Основные | Резервные | Основные / с учетом резервных |  |  |
| ГЛОНАСС | 3 | 8 | 2 | 24/30 | 19,1 | 64,8 |
| GPS | 6 | 4-6 | 1 | 24/32 | 20,2 | 55 |
| GALILEO | 3 | 9 | 1 | 27/30 | 23,2 | 56 |
| BEIDOU | 3 | 9 | 1 | 27/30 | 21,5 | 55 |

Основные свойства сигналов ГНСС ГЛОНАСС, влияющие на длительность поиска при холодном старте, приведены в таблицах 4.2.

Таблица 4.2 Основные свойства сигналов ГНСС ГЛОНАСС с точки зрения поиска

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Диапазон** | **Тип используемого сигнала** | **Несущая частота, МГц** | **Тип модуляции** | **Длина ДК (рабочая), символов** | **Период ДК, мс** | **Длительность символа ДК, мкс** |
| L1 | L1OF | 1602 + k\*0,5625 | BPSK  квадратура | 511 | 1 | ~ 2 |
|  | L1OCd | 1600,995 | BPSK(1)  временное уплотнение | 1023 | 2 | ~ 2 |
|  | L1OCp | 1600,995 | BOC(1,1)  временное уплотнение | 4092 | 8 | ~ 2 |
| L2 | L2OF | 1246 + k\*0,4375 | BPSK  квадратура | 511 | 1 | ~ 2 |
|  | L2OCd | 1248,06 | BPSK(1)  временное уплотнение | 1023 | 2 | 2 |
|  | L2OCp | 1248,06 | BOC(1;1)  временное уплотнение | 10230 | 20 | ~ 2 |

Основные свойства сигналов ГНСС GPS, влияющие на длительность поиска при холодном старте, приведены в таблицах 4.3.

Таблица 4.3 Основные свойства сигналов ГНСС GPS с точки зрения поиска

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Диапазон** | **Тип используемого сигнала** | **Несущая частота, МГц** | **Тип модуляции** | **Длина ДК (рабочая), символов** | **Период ДК, мс** | **Длительность символа ДК, мкс** |
| L1 | C/A | 1575,42 | BPSK(1) | 1023 | 1 | ~ 1 |

Продолжение таблицы 4.3

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| L2 | L2CMd | 1227,6 | BPSK (1)  временное уплотнение | 10230 | 20 | ~ 2 |
|  | L2CLp | 1227,6 | BPSK (1)  временное уплотнение | 767250 | 1500 | ~ 2 |