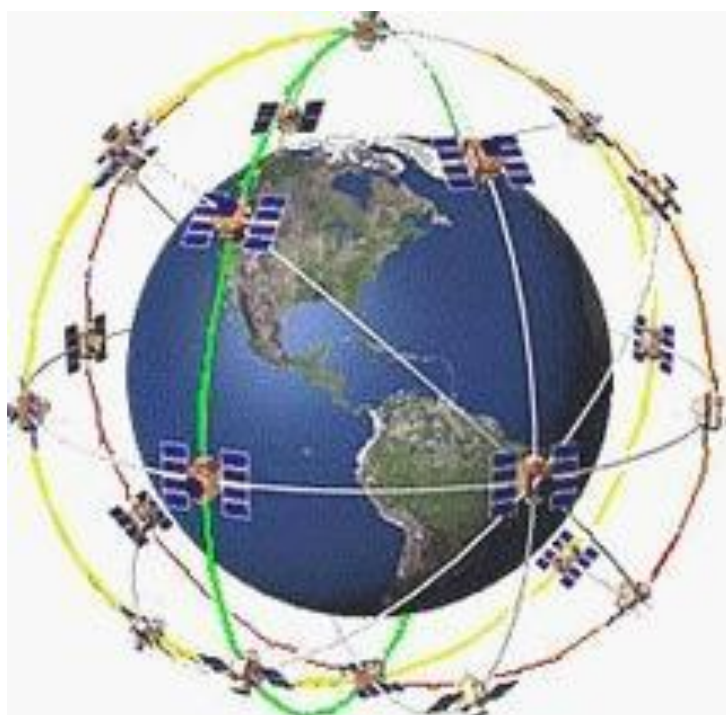


Н.Е. Быстров, И.Н. Жукова

**ВВЕДЕНИЕ
В СПУТНИКОВЫЕ
РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ
СИСТЕМЫ**



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
НОВГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ЯРОСЛАВА МУДРОГО**

Н.Е. Быстров, И.Н. Жукова

**ВВЕДЕНИЕ
В СПУТНИКОВЫЕ
РАДИОНАВИГАЦИОННЫЕ
СИСТЕМЫ**

Учебное пособие

**Великий Новгород
2017**

УДК 627.78

ББК 37.67

Печатается по решению
РИС НовГУ

Рецензенты:

Профессор В.М. Кутузов, доцент В.К. Орлов
(Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет)

Доктор технических наук, М.И. Бичурин
(Новгородский государственный университет)

Я 92 Быстров, Н.Е., Жукова И.Н. Введение в спутниковые радионавигационные системы: Учебное пособие / Н.Е. Быстров, И.Н. Жукова, НовГУ им. Ярим. Ярослав Мудрого, Великий Новгород, 2016 г.

В настоящем учебном пособии систематизирована информация о спутниковых навигационных системах GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. Изложены этапы развития навигационных систем и рассмотрены основные принципы их построения. Даны определения основных понятий, перечислены параметры навигационных систем. Приведены навигационные характеристики и задачи спутниковых систем. Изложены принципы модуляции навигационных сообщений и методы их помехоустойчивого кодирования. Особое внимание уделяется построению кодовых сигналов, модуляционных форматов и структуре навигационных сообщений в системах GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. Изложены принципы построения аппаратуры потребителей. Отражены направления развития спутниковых систем.

Учебное пособие отвечает новым образовательным стандартам и предназначено для подготовки магистров по направлению 110401 - «Радиотехника».

Пособие подготовлено и издано в рамках выполнения Госзадания Минобрнауки России.

УДК 627.78

ББК 37.67

Г 63

© Новгородский государственный университет, 2016 г.

© Н.Е. Быстров, И.Н. Жукова

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
ВВЕДЕНИЕ	7
1 ХАРАКТЕРИСТИКА СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ.....	9
1.1 Архитектура спутниковых радионавигационных систем	9
1.2 Спутниковая радионавигационная система GPS.....	11
1.3 Спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС	15
2 НАВИГАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЗАДАЧИ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ.....	20
2.1 Навигационные характеристики спутниковых систем.....	20
2.2 Навигационные задачи.....	22
2.3 Координатные системы местоположения	24
2.3 Время прохождения сигнала	27
3 МОДУЛЯЦИОННЫЕ ФОРМАТЫ СИГНАЛОВ И СТРУКТУРА НАВИГАЦИОННЫХ СООБЩЕНИЙ	31
3.1 Навигационные радиосигналы в системе ГЛОНАСС	31
3.2 Навигационные радиосигналы в системе GPS	37
4 ПОИСК И СЛЕЖЕНИЕ ЗА СПУТНИКОВЫМИ СИГНАЛАМИ.....	39
4.1 Процедура последовательного поиска	39
4.2 Методы ускорения поиска.....	41
4.3 Слежения за задержкой сигналов.....	41
5 ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЕ КОДИРОВАНИЕ СООБЩЕНИЙ	44
5.1 Построение кодов Хэмминга.....	45
5.2 Кодирование и декодирование систематических кодов Хэмминга.....	47
5.3 Коды расширения и укорочения.	49
6 ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ.....	55
6.1 Структура навигационного приемника GPS	55
6.2 Построения радиочастотных частей совмещённого приёмника	56
6.3 Алгоритмы первичной обработки сигналов.....	58
6.4 Определение координат потребителя.....	59
6.5 Факторы, влияющие на точность определения вектора потребителя	60
6.6 Краткий обзор аппаратуры потребителей	61
7 НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ.....	67
7.1 Общая характеристика навигационных систем GPS и ГЛОНАСС	67

7.2 Дифференциальная подсистема СРНС.....	68
7.3 Развитие мировой спутниковой системы.....	70
7.5.2 Китайская спутниковая радионавигационная система.....	71
7.5.3 Японская спутниковая система	72
7.5.4 Индийская региональная СРНС	73
7.4 Модернизация навигационной системы ГЛОНАСС	73
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	76
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	76

ПРЕДИСЛОВИЕ

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС), наряду с системами мобильной связи, стали неотъемлемой частью человеческой деятельности.

Спутниковая навигация впитала в себя достижения многих областей науки и техники и охватывают широкий круг потребительских задач. Технологии спутникового координатно-временного обеспечения используются в различных технических системах, быту, науке и образовании, в экономике и т.д. Учитывая сказанное, понятен постоянно возрастающий интерес к основам и принципам построения СРНС.

Структура учебных планов подготовки магистров по направлению 110401.68 - «Радиотехника» характеризуется существенным сокращением числа часов, отводимых на лекционные занятия, в рамках которых необходимо изложить концептуальные основы дисциплины, перенеся изучение деталей и подробностей на самостоятельную работу. Это обстоятельство и побудило авторов к написанию учебного пособия, отвечающего изложенной выше стратегии преподавания.

Учебный курс должен быть компактным и содержать по возможности строгое изложение принципов построения спутниковых навигационных систем

Изучение дисциплины «Спутниковые радионавигационные системы» опирается на серьезную математическую подготовку, теорию и технику радиосистем.

В пособии достаточно полно отражены вопросы построения спутниковых навигационных системах GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС, приведены навигационные характеристики и изложены принципы модуляции навигационных сообщений и методы их помехоустойчивого кодирования. Завершается пособие разделами построения аппаратуры потребителей и развития спутниковых систем.

Авторы выражают искреннюю признательность профессору В.М. Кутузову и доценту В.К. Орлову кафедры радиотехнических систем СПбГЭТУ (ЛЭТИ) за рецензирование и полезные замечания, способствующие качественному изложению материалов пособия.

ВВЕДЕНИЕ

Системы глобального позиционирования и в США, и в России создавались, прежде всего, для военных целей. В 1960...1970-е гг. гонка вооружений была в самом разгаре, и военные остро нуждались в высокоточной системе позиционирования, действующей в любом месте земного шара и круглосуточно доступной для любого военного объекта. Первым требованием военных было создание системы точного наведения ракет и бомбардировщиков на цель. Кроме этого, военно-морской флот остро нуждался в эффективной и надежной системе навигации для подводных лодок. С одной стороны, необходимо обеспечить позиционирование самой субмарины, а с другой стороны, организовать наведение на цель имеющихся на борту баллистических ракет.

С точки зрения массового потребителя, система спутникового позиционирования совершила относительно "тихое" вторжение в нашу повседневную жизнь.

При разработке архитектуры СРНС ключевым являлось требование обеспечения непрерывных высокоточных измерений координат потребителя в произвольной точке земного шара.

Первыми шагами на пути решения названной задачи стали предложения по модернизации СРНС первого поколения путем наращивания общего числа КА до 30 и увеличению высоты их орбит до 2700 км. Также предлагалось на использовавшиеся ранее несущие частоты наложить модуляцию псевдослучайной последовательностью, организовав *дальномерный канал*. Однако подобные меры позволяли реализовать практически непрерывное измерение местоположения лишь по двум КА.

Следующим этапом развития идеи непрерывного и одномоментного позиционирования стал поиск путей определения положения объекта, включающего три пространственные координаты и составляющие вектора скорости по каждой из них. Кроме того, для повышения точности доплеровских измерений требуется определять еще и смещение бортовой опорной частоты. Таким образом, общее число оцениваемых параметров возрастает до восьми. Последнее обстоятельство стало причиной активного анализа таких вариантов построения СРНС, которые гарантируют видимость не менее *четырех КА* в любой точке земной поверхности.

Результатом отработки в 1967-1977 гг. базовых принципов и технических решений на специальных технологических навигационных спутниках стало появление СРНС второго поколения. Разработанная в США система получила название «Навстар» (Navstar – Navigation Satellite Time and Range). Аналогичная система, развернутая силами СССР, была названа «ГЛОНАСС» (Глобальная Навигационная Спутниковая Система).

Точностные характеристики таких систем определяются выбранной геометрией созвездия КА, стабильностью бортовых эталонов опорной частоты, выбором сигнала и способов его обработки.

К основным достоинствам СРНС относятся глобальное покрытие, высокая точность определения координат и составляющих скорости, единая для всех потребителей система координат, независимость точности от времени года, суток и погодных условий, неограниченность числа обслуживаемых абонентов, возможность применения приемной аппаратуры различных классов точности и т.д.

К сожалению, фактическим "законодателем стандартов" в спутниковом позиционировании стали Соединенные Штаты. Речь идет о широко распространенном потребительском оборудовании, которое во всем мире ассоциируется, прежде всего, с принадлежащей США навигационной системой NAVSTAR. Завершенность национальной спутниковой системы определяется не только количеством спутников на орбите, но и наличием развитой индустрии потребительского оборудования.

Каждый спутник, входящий в состав GPS, излучает радиосигнал определенного вида. Любое пользовательское устройство GPS, гражданское или военное, является приемником этих радиосигналов. Именно поэтому возникло устойчивое бытовое словосочетание "приемник GPS". Недостаточно принять сигналы со спутников, необходимо произвести измерение их параметров, извлечь заложенную в них информацию и произвести довольно сложные вычисления. Устройство, которое выполняет все эти операции, называют пользовательским терминалом GPS. Но традиционно, в быту, мобильные терминалы GPS называют просто приемниками GPS.

Использование навигационных спутников, позволяет сделать пользовательское оборудование по-настоящему мобильным. Мобильность повышается также за счет того, что максимально возможная функциональная нагрузка вынесена на спутники и наземные станции управления, а мобильное приемное устройство должно произвести лишь окончательную обработку заранее подготовленной информации.

С появлением портативных приемников GPS возникла идея создания принципиально новой автомобильной системы безопасности. Такая система способна точно отслеживать координаты автомобиля и передавать их на пост контроля, используя обычную сотовую связь. Появилась возможность принципиально перестроить систему управления движением поездов, размещая на них приемники GPS. Новая система способна не только точно отслеживать и оптимизировать движение поездов, но и автоматически включать режим экстренного торможения при опасном сближении составов. Более того, в настоящее время GPS используется даже для решения такой чрезвычайно критичной задачи, как автоматическое выведение летательных аппаратов на посадочную глиссаду и далее до точки касания со взлетно-посадочной полосой.

Эти факты лишний раз доказывают, что в ближайшем будущем системы спутниковой навигации будут все больше влиять на качество нашей повседневной жизни.

1 ХАРАКТЕРИСТИКА СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

1.1 Архитектура спутниковых радионавигационных систем

Космодром обеспечивает вывод КА на заданные орбиты, а также периодическое восполнение созвездия по мере выработки спутниками ресурса. Рассмотрим архитектуру современных спутниковых радионавигационных систем.

Спутниковая система включает в себя три сегмента:

- космический сегмент, включающий орбитальную группировку (ОГ) навигационной космической аппаратуры (НКА);
- сегмент управления или наземный комплекс управления (НКУ) орбитальной группировкой НКА;
- сегмент потребителей или навигационная аппаратура пользователей (НАП).

Из этих трех сегментов последний, аппаратура пользователей, является самым многочисленным. В СРНС число потребителей не ограничивается, поскольку НАП не передает радиосигналы на НКА, а только принимает их от НКА (пассивная автономная навигация). В НАП на подвижном объекте в сеансе навигации принимаются радиосигналы не менее чем от четырех радиовидимых НКА и используются для измерения трех разностей дальностей и трех разностей радиальных скоростей объекта относительно четырех НКА. Результаты измерений и эфемероидная информация (ЭИ), принятая от каждого НКА, позволяют определить (уточнить) три координаты и три составляющие вектора скорости подвижного объекта и определить смещение шкалы времени (ШВ) объекта относительно ШВ системы.

Наземный комплекс управления (НКУ) орбитальной группировкой НКА выполняет четыре группы задач:

1. эфемероидное и частотно-временное обеспечение НКА;
2. мониторинг радионавигационного поля;
5. радиотелеметрический мониторинг НКА;
5. командное и программное радиоуправление функционированием НКА.

Наземный сегмент обеспечивает эфемероидное обеспечение спутников. Это означает, что на земле определяются параметры движения спутников и прогнозируются значения этих параметров на заранее определённый промежуток времени. Параметры и их прогноз закладываются в навигационное сообщение, передаваемое спутником наряду с передачей навигационного сигнала. Измерение и прогноз параметров движения НКА производятся в Баллистическом центре системы по результатам траекторных измерений дальности до спутника и его радиальной скорости. Сюда же входят частотно-временные поправки бортовой шкалы времени спутника относительно системного времени.

Навигационная аппаратура потребителя осуществляет обработку принимаемых сигналов КА с целью измерения полного вектора состояния объекта. Для этого приемник на основании полученного ранее и хранящегося в памяти альманаха производит выбор рабочей "четверки" из совокупности своего созвездия.

Для решения задач навигации принимаемые сигналы должны иметь такую структуру, чтобы их можно было разделить и достаточно точно измерить параметры: задержку, доплеровское смещение частоты, фазу. Отсюда вытекают два основных требования, предъявляемых к радиосигналам:

- возможность их эффективного разделения в приемнике;
- обеспечение высокой точности измерения параметров сигнала.

В СРНС используются два метода разделения сигналов: в СРНС GPS - кодовое и СРНС ГЛОНАСС - частотное.

При кодовом разделении каждый сигнал излучается на одной и той же частоте и модулируется своим индивидуальным кодом, причем используемые коды должны быть по возможности ортогональны между собой.

При частотном разделении сигналов, каждому из них отводится своя полоса частот, а спектр сигнала должен быть достаточно компактным (в идеале - строго полосовым). Так как реализация строго полосовых сигналов практически невозможна, реальные сигналы имеют частично перекрывающиеся спектры, что определяет их не ортогональность и взаимное влияние сигналов друг на друга при их приеме и обработке, т.е. приводит к внутрисистемным помехам.

Важно отметить, что время запаздывания принятого сигнала относительно шкалы времени потребителя включает начальное расхождение шкал времени потребителя и ИСЗ и задержку распространения сигнала на трассе ИСЗ-потребитель. Если фазы опорных генераторов потребителя и ИСЗ совпадают (расхождение шкал времени равно нулю), то измеряемое время запаздывания пропорционально дальности между КА и потребителем. В противном случае оно пропорционально квазидальности (псевдодальности) и для оценки координат необходимо использовать квазидальномерные или разностно-дальномерные измерения.

Измерение времени запаздывания принимаемого сигнала производится на основе корреляционного метода. Поиск максимума функции корреляции на плоскости время-частота тем надежнее, чем меньше уровень боковых лепестков.

На номинальные значения частот принимаемых потребителем сигналов воздействует переменное по частоте и знаку доплеровское смещение. Оно имеет максимальное положительное значение, когда НКА движется из-за горизонта навстречу потребителю, постепенно уменьшается и становится равным нулю, когда положение НКА на небосклоне достигает апогея по отношению к наблюдателю. Затем доплеровское смещение меняет знак и увеличивается по мере движения НКА к горизонту. Чем ближе к точке зенита

с точки зрения наблюдателя проходит орбита НКА, тем больше величина доплеровского смещения.

Потребитель способен вычислить свое положение на основании измеренного расстояния при условии знания координат КА. Поскольку при передвижении по своим орбитам спутники непрерывно вращаются, то их координаты постоянно изменяются, и их мгновенные значения необходимы потребителю в любой момент времени, в которой осуществляется его местоопределение. Мгновенное положение спутника на орбите не является полностью детерминистическим вследствие случайных воздействий той или иной природы. Аналогично, спутниковые стандарты частоты, хотя и очень стабильные, раньше или позже накапливают относительную временную расстройку, ухудшающую точность местоопределения. Таким образом, необходимо отслеживать положение спутников и поведение спутниковых генераторов частоты и сообщать об этом потребителю.

В связи с тем, что для определения координат необходимо иметь сведения о местоположении ИСЗ на каждый момент времени на борту потребителя следует располагать эфемероидной информацией. Для этого на борту КА дальномерный спутниковый радиосигнал подвергается дополнительной бинарной фазовой манипуляции в соответствии с информационным сообщением, представленным последовательностью нулей и единиц.

Основной геометрической характеристикой орбитальной группировки штатных НКА в системе СРНС, от которой зависит точность навигации наземных потребителей, являются геометрические свойства созвездия НКА, которое «видит» наземный потребитель. Минимально необходимое для наземного потребителя оптимальное созвездие содержит четыре НКА: один НКА вблизи зенита, три НКА вблизи горизонта равномерно разнесенных по направлению.

1.2 Спутниковая радионавигационная система GPS

Полное созвездие GPS состоит из 24 действующих и не менее трех резервных КА, гарантируя глобальное трех координатное высокоточное навигационное определение в любой момент времени. Космический сегмент представляет собой совокупность из шести наклоненных к плоскости экватора круговых орбит, высотой около 20 180 км по четыре спутника на каждой орбите. Орбиты сдвинуты друг относительно друга на 60° по долготе и имеют наклон в 55° . Период обращения КА составляет 11 ч. 58 мин. Структура созвездия спутниковой радионавигационной системы GPS представлена на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Структура созвездия GPS

. Подобное пространственное расположение позволяет одновременно наблюдать не менее 4-х спутников в любой момент времени и любой точке земной поверхности при угле возвышения 10° . Однако в большинстве случаев число видимых спутников больше, достигая в некоторые моменты времени 7. Чем больше число одновременно наблюдаемых космических носителей, тем выше точность местоопределения и времени.

Спутниковые радиосигналы в системе GPS

На борту каждого спутника имеется атомный (цезиевый или рубидиевый) стандарт частоты, характеризующийся чрезвычайно высокой стабильностью: за сутки уход частоты от номинала не превышает 10^{-13} . Основной атомный стандарт частоты каждого GPS спутника вырабатывает частоту 7.23 МГц. Когерентное частотное умножение на 154 и 120 образует две частоты в L-диапазоне с номиналами $L1=1575.42$ МГц и $L2=1223.60$ МГц.

В системе GPS используются навигационные радиосигналы на двух несущих частотах (верхней и нижней) $L1=1575.42$ МГц; $L2=1227.6$ МГц. Более высокая несущая частота $L1$ является основной и ее сигнал доступен любому GPS приемнику, тогда как более низкая частота $L2$ предназначена к использованию только авторизированным пользователями для высокоточных измерений.

В СРНС GPS используется кодовое разделение сигналов разных КА системы. В системе используются два дальномерных кода: C/A-код (*код умеренной точности* или *легкого доступа*) и P-код (*высокой точный* или *защищенный код*). Спектральные характеристики сигналов в системе GPS отражены на рис. 1.2.

Каждому спутнику назначается своя специфическая пара C/A- и P-кодовых последовательностей Голда.

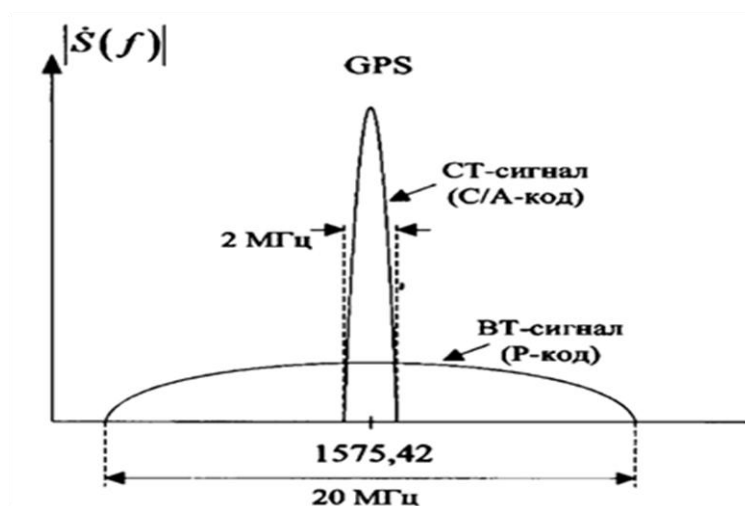


Рис. 1.2. Спектральные характеристики сигналов в системе GPS

С/А-код обеспечивает стандартную точность местопределения и доступен любому пользователю, обладающему GPS приемником. С/А-код представляет собой последовательность Голда длины $N=1023$ с периодом сигнала в точности равному 1 мс. Очевидно, что число (1025) существующих последовательностей Голда длины $N=1023$ во много раз превосходит необходимое для спутников GPS их количество, так что используются только некоторые из них.

Р-код предназначен для позиционирования с высокой точностью и поэтому имеет длительность чипа в 10 раз меньшую, чем С/А-код (<100 нсек), или в 10 раз более широкую полосу. Р-код формируется путем посимвольного сложения по модулю 2 двух очень длинных бинарных последовательностей, отличающихся по длине на 37 чипов. Это позволяет сформировать 37 индивидуальных последовательностей Р-кода длиной 7 дней ($4.187104 \cdot 10^{12}$ чипов). Неперекрывающиеся 7-дневные сегменты этой последовательности используются в качестве Р-кодов различных спутников. Из них 32 варианта используются НКА, остальные 5 зарезервированы специальных целей.

Y-код применяется вместо Р-кода при включении режима предотвращения преднамеренных помех и несанкционированного доступа к информации. Y-код представляет собой закрытый Р-код, и доступен для расшифровки только лицензированными пользователями, имеющими соответствующий ключ. Поэтому Y-код принято обозначать как P(Y) код.

Несмотря на жесткую синхронизацию всех спутников расстояние между ними и потребителем изменяется в ходе эволюций спутников, так что сигналы различных спутников достигают приемной антенны потребителя со взаимными временными сдвигами, изменяющимися в значительном диапазоне. Поскольку каждый спутник идентифицируется своей специфической последовательностью Голда и все сигналы обладают низким уровнем взаимной корреляцией. Пользовательский приемник способен выделить любой индивидуальный сигнал спутника от других. Мощность внеполосного излучения за пределами полос

шириной 20.46 МГц для частот $L1$ и $L2$ не превышает -40 дБ относительно мощности немодулированных несущих.

Первоначально планируемая точность местоопределения по С/А-коду системы GPS составляла в горизонтальном направлении около 100 м и 156 м в вертикальном направлениях с вероятностью удержания ошибки местоопределения в этих пределах, равной 95%. Аналогичные цифры для Р-кода составляли 16 и 23 м.

Наземный комплекс управления системы

В состав системы GPS входит сегмент управления, состоящий из главной станции управления в Колорадо Спрингс (штат Колорадо) и пяти станций слежения, расположенных в Колорадо Спрингс, Гавайях, Кваджалейне, Диего Гарсия и острове Вознесения. Сегмент наземного комплекса управления системы GPS представлен на рис. 1.3.



Рис. 1.3. Наземный комплекс управления системы GPS

Станции слежения непрерывно отслеживают спутники и передают информацию на главную станцию. Главная станция вычисляет поправки синхронизации атомных часов спутников. Она также исправляет орбитальную информацию (эфемериды спутников). Главная станция передаёт результаты своей работы станциям загрузки.

В наземных комплексах управления системы GPS подсистемы эфемероидного обеспечения и частотно-временного обеспечения построены совместно. Для передачи служебной информации применяется код D (*Data*), которым модулируются дальномерный код на обеих несущих частотах. Внеполосные излучения системы подвергаются режекции до уровня -40 дБ относительно уровня немодулированной несущей.

В аппаратуре потребителей измеряются псевдодальность до КА по оценке задержки дальномерной ПСП и радиальная скорость по оценке доплеровского

смещения частоты несущей. В сигналах открытого и закрытого кодов содержится служебная информация: эфемериды, альманах, частотно-временные поправки, метки времени, сведения о работоспособности бортовой аппаратуры. По результатам измерений при использовании служебной информации решается навигационно-временная задача.

В одном кадре навигационного сигнала передается 1/25 альманаха, так что для получения полного альманаха требуется принять 25 кадров, образующих суперкадр длительностью 12,5 мин.

1.3 Спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС

Российская навигационная система ГЛОНАСС имеет много общих черт с системой GPS. На рис. 1.4 изображена модель орбитальной группировки спутников в системе ГЛОНАСС.

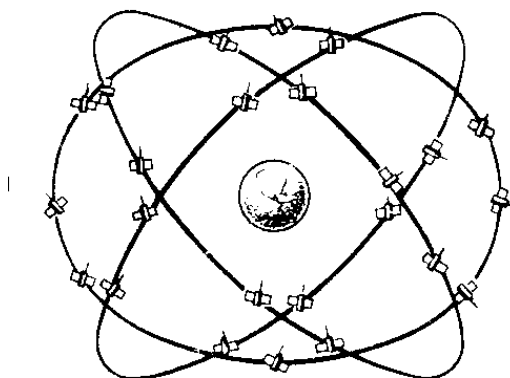


Рис. 1.4. Структура созвездия ГЛОНАСС

Полная проектная орбитальная группировка в СРНС ГЛОНАСС содержит 24 штатных НКА. Номинальная высота круговой орбиты составляет 19100 км над поверхностью Земли. Космический сегмент расположен на 3-х околокруговых орбитах с номинальным периодом обращения 11 часов 15 минут и наклоном в 65.8° к плоскости экватора. Долготы восходящих узлов трех орбитальных плоскостей различаются номинально на 120° . В каждой орбитальной плоскости восемь НКА разнесены по аргументу широты номинально через 45° , и аргументы широты восьми НКА в трех орбитальных плоскостях сдвинуты на $\pm 15^\circ$.

Спутниковые радиосигналы в системе ГЛОНАСС

В СРНС ГЛОНАСС для обеспечения ионосферной коррекции задержек используются две частоты из диапазонов $L1 = 1600$ МГц и $L2 = 1250$ МГц. Все спутники передают одинаковый дальномерный код, являющийся бинарной M -последовательностью длиной 511 чипов, и используется частотное

разделение сигналов. Номинальные значения рабочих частот радиосигналов, передаваемых в диапазонах $L1$ и $L2$, определяются выражением:

$$f_{L1}^k = f_1 + k \cdot \Delta f_1; \quad f_{L2}^k = f_2 + k \cdot \Delta f_2,$$

k - номера литеров (каналов) рабочих частот спутников;

$$f_1 = 1602 \text{ МГц}; \quad \Delta f_1 = 9/16 = 0.5625 \text{ МГц};$$

$$f_2 = 1246 \text{ МГц}; \quad \Delta f_2 = 7/16 = 0.4375 \text{ МГц}.$$

Для каждого спутника рабочие частоты сигналов в диапазоне $L1$ и $L2$ когерентны и формируются от одного эталона частоты. Отношение рабочих частот несущей каждого спутника: $\Delta f_{k1}/\Delta f_{k2} = 7/9$.

Для экономии общей полосы частот противоположные спутники на одной и той же орбите (никогда не наблюдаемые одновременно потребителем) используют одинаковое смещение частоты. В табл. 1.1 показано значение несущих частот f_{Li}^k для двух диапазонов частот.

Табл. 1.1.

Номер канала	Частота, МГц		Номер канала	Частота, МГц	
	$L1$	$L2$		$L1$	$L2$
-07	1598,0625	1242,9375	04	1604,25	1247,75
-06	1598,625	1243,375	05	1604,8125	1248,1875
-05	1599,1875	1243,8125	06	1605,375	1248,625
-04	1599,75	1244,25	07	1605,9375	1249,0625
-03	1600,3125	1244,6875	08	1606,5	1249,5
-02	1600,875	1245,125	09	1607,0625	1249,9375
-01	1601,4375	1245,5625	10	1607,625	1250,375
00	1602,0	1246,0	11	1608,1875	1250,8125
01	1602,5625	1246,4375	12	1608,75	1251,25
02	1603,125	1246,875	13	1609,3125	1251,6875
03	1603,6875	1247,3125			

Номинальное значение частоты бортового генератора, с точки зрения наблюдателя, находящегося на поверхности Земли, равно 5.0 МГц. Фактические значения рабочих частот сигналов каждого НС могут отличаться от номинальных значений f_{Li}^k на относительное значение, не превышающее $\pm 2 \cdot 10^{-11}$.

Сигнал в диапазоне $L1$ доступен для всех потребителей в зоне видимости КА. Сигнал в диапазоне $L2$ предназначен для военных нужд, и его структура не раскрывается.

В радиолинии частотного диапазона $L1$ спутники системы ГЛОНАСС излучают навигационные радиосигналы двух типов: стандартной и высокой

точности (СТ- и ВТ- сигнал соответственно), которые позволяют выделить два соответствующих канала навигационного обслуживания - каналы стандартной и высокой точности. Сигнал стандартной точности предназначен для использования гражданскими потребителями, и предоставляемое им обслуживание доступно всем владельцам аппаратуры потребителей ГЛОНАСС. Сигнал высокой точности модулирован специальным кодом и не рекомендован к использованию без согласования с МО РФ, поэтому рассматриваемые каналы можно называть открытыми и закрытыми. Спектральные характеристики сигналов в системе ГЛОНАСС показаны в правой части на рис. 1.5.

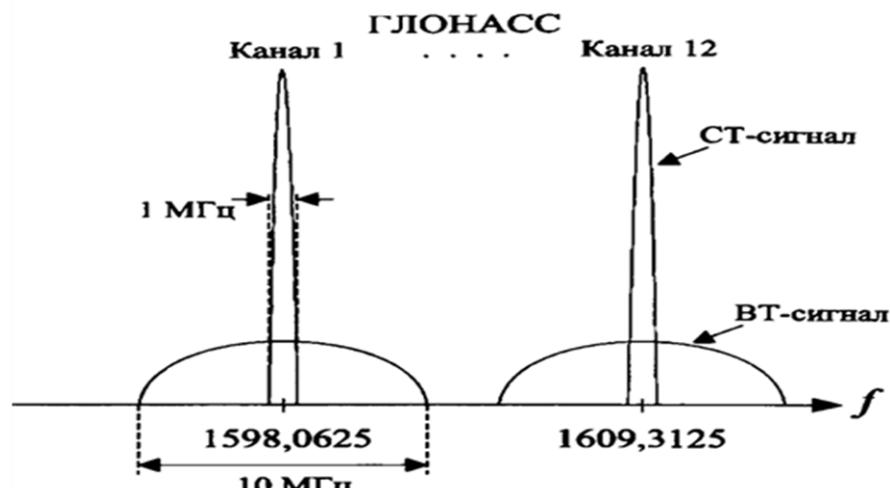


Рис. 1.5. Спектральные характеристики сигналов в системе ГЛОНАСС

Узкополосный навигационный СТ- радиосигнал образуется посредством манипуляции фазы несущего колебания на 180° периодической двоичной псевдослучайной M -последовательностью (ПСП1) с тактовой частотой $F1 = 0,511$ МГц и с периодом повторения $T1 = 1$ мс (511 тактов)

Широкополосный навигационный ВТ-радиосигнал образуется посредством манипуляции фазы несущего колебания на 180° периодической двоичной последовательностью ПСП-2 с тактовой частотой $F2=5,11$ МГц. Ширина основного «лепестка» огибающей спектра мощности фазоманипулированного навигационного радиосигнала равна двойному значению тактовой частоты ПСП. Следовательно, ширина основного «лепестка» огибающей спектра мощности узкополосного навигационного радиосигнала равна $1,022$ МГц, а широкополосного - $10,22$ МГц.

Навигационные СТ- сигналы с тактовой частотой 511 кГц занимают в частотном диапазоне $L1$ полосу шириной $(1598,0623...1609,3125) \pm 0,511$ МГц. Навигационные ВТ- сигналы с тактовой частотой $5,11$ МГц занимают в частотном диапазоне сигналов $L1$ полосу шириной $(1598,0623...1609,3125) \pm 5,11$ МГц. Сведения о распределении частотных каналов между спутниками, расположенными в орбитальных рабочих точках содержатся в альманахе системы.

Минимальная мощность принимаемого пользователем сигнала на выходе изотропной линейно поляризованной антенны с коэффициентом усиления $+3$ дБ,

ориентированной на угол места 5° у поверхности Земли составит -161 дБВт в диапазоне L1 и -167 дБВт в диапазоне L2.

Все радиосигналы (стандартной и высокой точности в диапазонах L1 и L2), формируемые на борту каждого НС, когерентны, так как формируются от общего высокостабильного генератора. При этом спектральная плотность фазовых шумов немодулированной несущей такова, что схема слежения за фазой сигнала с односторонней шумовой полосой 10 Гц обеспечивает точность слежения за фазой несущей не хуже $\sigma = 0,1$ рад.

В зоне видимости потребителя СРНС всегда находится более четырех спутников, каждый из которых излучает радиосигналы. Так как спектры сигналов не являются строго ограниченными по частоте то, при обработке сигнала одного из спутников сигналы других спутников мешают и их относят к внутрисистемным помехам. Доля мощности одного ближайшего по частоте помехового сигнала относительно полезного составляет примерно $2 \cdot 10^{-5}$, т. е. не превышает -48 дБ, что и определяет уровень внутрисистемных помех СРНС «Глонасс». Точность в системе «Глонасс» имеет тот же уровень, что и в системе GPS.

Наземный комплекс управления системы

Наземный комплекс управления системы ГЛОНАСС выполняет аналогичные системы GPS задачи. Сегмент наземного комплекса управления представлен на рис. 1.5. Наземный комплекс управления (НКУ) орбитальной группировкой НКА выполняет четыре группы задач:

1. эфемероидное и частотно-временное обеспечение НКА;
2. мониторинг радионавигационного поля;
5. радиотелеметрический мониторинг НКА;
5. командное и программное радиоуправление функционированием НКА.

Эфемероидное обеспечение (ЭО) НКА означает: определение и прогноз параметров движения НКА и «закладку» на борт НКА эфемероидной информации (ЭИ) для кадров цифровой информации (ЦИ) в навигационных радиосигналах. Это означает, что на земле определяются параметры движения спутников и прогнозируются значения этих параметров на заранее определённый промежуток времени. Параметры и их прогноз закладываются в навигационное сообщение, передаваемое спутником наряду с передачей навигационного сигнала. Сюда же входят частотно-временные поправки бортовой шкалы времени спутника относительно системного времени. Измерение и прогноз параметров движения НКА производятся в Баллистическом центре системы по результатам траекторных измерений дальности до спутника и его радиальной скорости.



Рис. 1.5. Наземный комплекс управления системы ГЛОНАСС

Частотно-временное обеспечение (ЧВО) НКА означает определение и прогноз бортовой шкалы времени (БШВ) относительно шкалы времени (ШВ) системы и «закладку» на борт НКА частотно-временных поправок (ЧВП) к БШВ, помещаемых в кадры ЦИ в навигационных радиосигналах. Определение и прогноз параметров движения НКА осуществляет Баллистический центр (БЦ) системы на основе результатов траекторных измерений дальности и радиальной скорости НКА, поступающих от сети наземных радиотехнических «запросных» командно-измерительных пунктов (КИП). В НКУ используются не менее трех КИП, расположенных на территории России (западная, центральная, восточная) на географической широте в пределах $50^{\circ}...60^{\circ}$ с.ш. КИП на географической широте не менее 50° с.ш. «наблюдает» каждый НКА при углах возвышения не менее 5° в течение сеансов длительностью 1...5 ч на каждом витке орбиты НКА.

Обе эти системы GPS и «Глонасс» рассматриваются в настоящее время как содействующие друг другу, образующие интегрированную Глобальную Навигационную Спутниковую Систему (ГНСС). Как уже подчеркивалось, увеличение числа обрабатываемых спутниковых сигналов увеличивает точность местоопределения, так что очевидна выгода от совместного использования обоих спутниковых созвездий. Кроме того, не редки случаи, когда некоторые спутники над горизонтом заслонены (например, крылом самолета), так что общее число доступных дальномерных сигналов только системы GPS или только не достаточно для местоопределения. Большое число моделей приемников, представленных на рынке или планируемых к разработке, пригодны к совместной обработке сигналов обеих систем.

2 НАВИГАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЗАДАЧИ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

В СРНС каждый штатный НКА излучает навигационные радиосигналы в сторону Земли с помощью передающих антенн. Излучаемые радиосигналы образуют радионавигационное поле в околоземном пространстве.

2.1 Навигационные характеристики спутниковых систем

К основным навигационным характеристикам НКА относятся:

- зона обзора;
- зона видимости;
- продолжительность наблюдения.

Зоной обзора НКА называется участок земной поверхности, на котором можно принимать сигналы НКА и осуществлять за ним наблюдение. Центром зоны обзора является географическое место спутника - точка O_3 , расположенная в месте пересечения земной поверхности с линией, соединяющей центры масс Земли и НКА. Зоной обзора и географическое место спутника иллюстрируется на рис. 2.1.

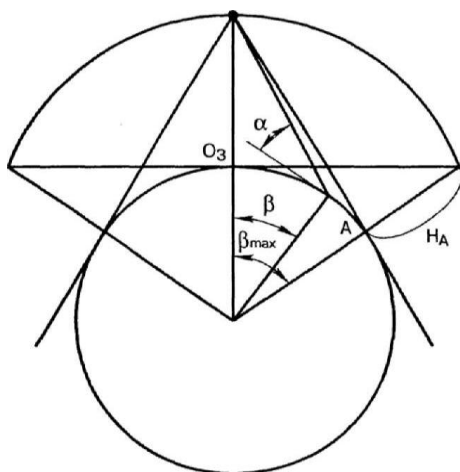


Рис. 2.1. Зона обзора и географическое место спутника

При движении спутника по орбите на поверхности Земли образуется совокупность географических мест - *трасса спутника*.

Размер зоны обзора характеризуется величиной угла $\beta_{\max}$ и зависит от высоты H_A полета спутника, так как зона обзора ограничена линией истинного горизонта. Величина $\beta_{\max}$ может быть найдена из выражения

$$\beta_{\max} = \arccos \left[R_3 / (R_3 + H_A) \right]. \quad (2.1)$$

Существует понятие *радиогоризонта* - гипотетической линии горизонта, поднятой над линией истинного горизонта на угол маски $\alpha = 5^\circ \dots 10^\circ$. Работоспособность СРНС и соответствие ее характеристик техническим условиям гарантируется при наблюдении спутников, расположенных не ниже линии радиогоризонта. В этом случае зона обзора определяется углом $\beta < \beta_{\max}$, где

$$\beta = \arccos \left[R_3 \cos \alpha / R_3 + H_A \right] - \alpha. \quad (2.2)$$

Важными параметрами СНС являются *площадь обзора*

$$S_{\text{об}} = 2\pi R_3^2 (1 - \cos \beta_{\max}) \quad (2.2,а)$$

и *относительная площадь обзора*

$$S_{\text{об}} / S_3 = \sin^2 \beta_{\max} / 2, \quad (2.2,б)$$

где $S_3 = 4\pi R_3^2$ - площадь поверхности Земли.

Спутниковая система ГЛОНАСС имеет следующие характеристики обзора: $\beta_{\max} \approx 75.52^\circ$, $S_{\text{об}}/S \approx 30\%$, $H_A \approx 19100 \dots 20200$ км, $\alpha = 10^\circ$.

Перечисленные характеристики оптимальны для построения СРНС, так как дальнейшее увеличение высоты полета незначительно расширяет зону обзора, но существенно увеличивает затраты на формирование созвездия спутников.

Область небосвода, в которой НКА наблюдается с момента восхода $\tau_{\text{вх}}$ над горизонтом, до момента захода $\tau_{\text{вых}}$, называется зоной видимости. Определение условий видимости НКА для наблюдателя, расположенного в точке O_3 , лежащей на трассе спутника, иллюстрируется на рис. 2.2.

Радиогоризонт находится выше истинного горизонта, поэтому угловой радиус зоны обзора уменьшается на величину α . В данном случае угол α принято называть минимально допустимой высотой (радиогоризонта).

Продолжительность видимости НКА определяется разностью $t_{\text{вид}} = \tau_{\text{вых}} - \tau_{\text{вх}}$ и зависит от высоты полета, либо от периода обращения НКА. В случае круговой орбиты

$$t_{\text{вид}} = 2\beta / \nu = T \cdot \beta / \pi, \quad (2.4)$$

где $\nu = 2\pi/T$ - угловая скорость обращения спутника.

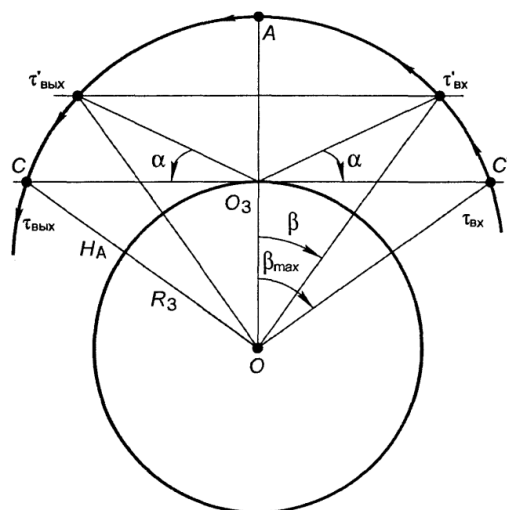


Рис. 2.2. Зона видимости навигационных космических аппаратов

Продолжительность видимости максимальна, если потребитель находится на трассе НКА (спутник проходит через зенит). Для системы ГЛОНАСС продолжительность видимости $t_{\text{вид}} \approx 300$ мин. Разумеется, если потребитель находится в стороне от трассы НКА, продолжительность видимости уменьшается. Приемник потребителя, как правило, принимает сигналы от нескольких НКА, расположенных в зоне видимости и использует алгоритм, позволяющий выбрать оптимальное сочетание НКА.

2.2 Навигационные задачи

Навигационной задачей в СРНС принято называть нахождение пространственно-временных координат потребителя и составляющих вектора его скорости, в совокупности называемых *вектором потребителя*.

В результате решения навигационной задачи в общем случае должны быть найдены пространственные координаты потребителя x, y, z , поправка t к шкале времени потребителя относительно шкалы времени СНС и составляющие вектора скорости как производные от координат потребителя во времени.

Потребитель имеет возможность измерять задержку сигнала и доплеровский сдвиг частоты (*радионавигационные параметры*), а также выделять из сигнала данные альманаха и эфемерид (*навигационное сообщение*).

Геометрические параметры, которые соответствуют радионавигационным, принято называть *навигационными параметрами*. Так, задержке сигнала τ соответствует дальность $R = c \cdot \tau$, где c - скорость света; доплеровскому смещению частоты f_d соответствует радиальная скорость сближения

$V_r = f_d \cdot \lambda$, где λ - длина волны излучаемого НКА сигнала.

Функциональную связь между навигационными параметрами и вектором потребителя называют *навигационной функцией*. Конкретный вид функции определяется многими факторами: системой координат, характером движения потребителя и т.п.

В открытом пространстве геометрическое место точек с одинаковым значением R образует *поверхность положения* в виде сферы с радиусом R и центром, совпадающим с фазовым центром передающей антенны НКА. При пересечении двух поверхностей положения образуется *линия положения* - совокупность точек, имеющих два заданных значения навигационного параметра R . Пересечение двух сфер дает линию положения в виде окружности. Поверхности и линии положения изображены на рис. 2.3.



Рис. 2.3. Поверхности и линии положения

Местоположение конкретной точки определяется по пересечению двух линий положения или, соответственно, трех поверхностей положения. В ряде случаев две линии положения могут пересекаться в двух точках, что порождает *неоднозначность местоположения*. Устранить неоднозначность можно лишь введением еще одной линии положения или дополнительной информации о местоположении.

В действительности, позиция местоположения потребителя должна быть определена в трехмерном пространстве, а не на плоскости. Различие между плоскостью и трехмерным пространством состоит в дополнительном измерении (высота Z), дополнительный третий спутник должен быть доступен для определения действительной позиции. Если расстояния до трех спутников известны, то все возможные позиции расположены на поверхности трех сфер, чьи радиусы соответствуют рассчитанным расстояниям. Искомая позиция – место пересечения всех трех сфер, изображенная на рис. 2.4.

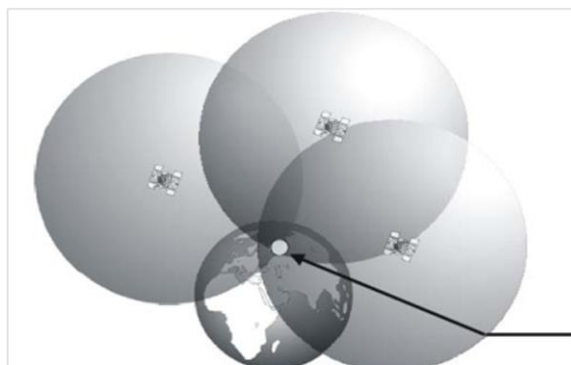


Рис. 2.4. Определение местоположения в 3-х мерном пространстве.

2.3 Координатные системы местоположения

Рассмотрим системы отсчетов местоположения объекта на земной поверхности. Сфероид Земли и его параметры изображены на рис. 2.5.

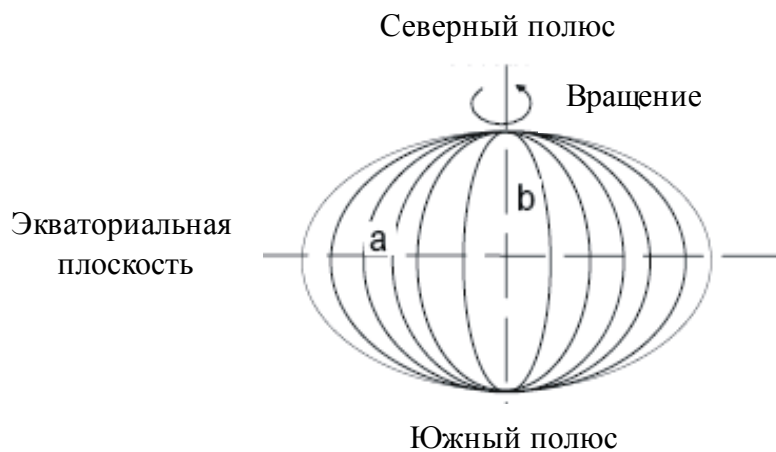


Рис. 2.5. Сфероид Земли.

Сфероид Земли определяется двумя параметрами:

- $a = 6\,378\,137.00$ - большая полуось (на экваториальной плоскости);
- $b = 6\,356\,752.31$ - малая полуось (ось северного и южного полюсов).

Значение, на которое форма отклоняется от идеальной сферы, называется выравнением: $f = \frac{a-b}{a}$.

Трехмерная декартова система координат изображена на рис. 2.5.

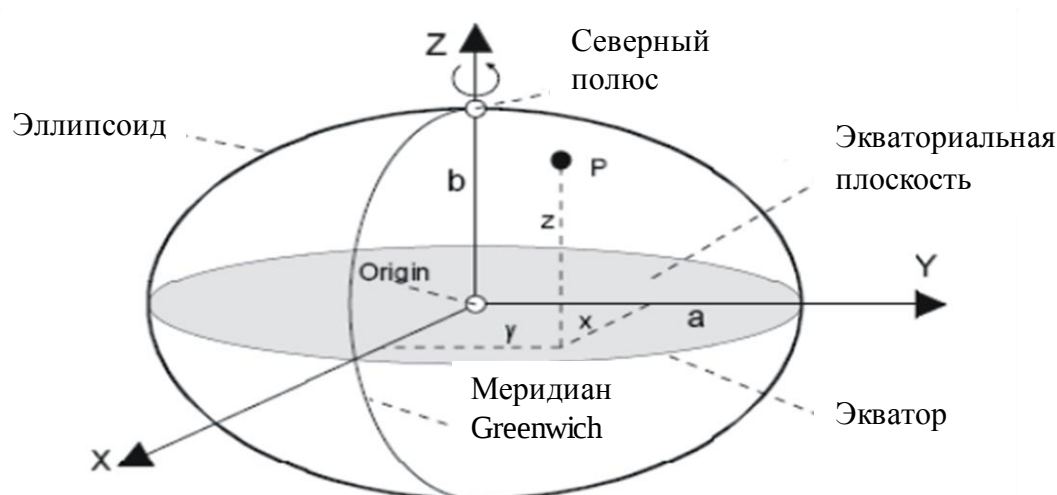


Рис. 2.5. Иллюстрация декартовых координат

Рассматриваемая система геоцентрически позиционирована относительно центра Земли. Положительная X-ось эллипсоида Земли лежит на экваториальной плоскости и проходит через центр, в которой экватор пересекает меридиан Greenwich (0 меридиан). Y-ось также лежит на экваториальной плоскости и смещена на 90° на восток от оси X. Z-ось лежит перпендикулярно X и Y и проходит через географический северный полюс.

Эллипсоидальная система координат представлена на рис.2.3.

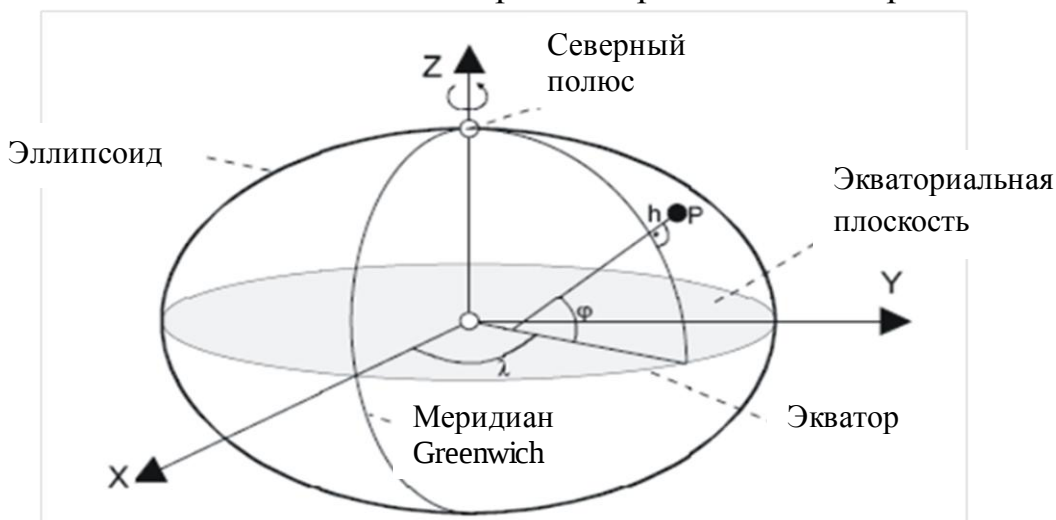


Рис. 2.3. Иллюстрация декартовых координат.

Эллипсоидальные координаты φ, λ, h удобнее для дальнейшей обработки, чем Декартовы координаты x, y, z : φ - соответствует широте, λ - долготе и h - эллипсоидной высоте, то есть длине вертикальной линии P в эллипсоиде.

Декартовы и эллипсоидальные координаты могут быть преобразованы от одних в другие. В качестве примера рассмотрим преобразование для центральной Европы. Это означает, что величины x, y, z являются положительными.

$$\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{z + \left[\left(\frac{a^2 - b^2}{b^2} \right) \cdot b \left[\sin \left[\tan^{-1} \left[\frac{z \cdot a}{\sqrt{x^2 + y^2}} \cdot b \right] \right] \right] \right]^3}{\sqrt{x^2 + y^2} - \left(\frac{a^2 - b^2}{a^2} \right) \cdot a \cdot \left[\cos \left[\tan^{-1} \left[\frac{z \cdot a}{\sqrt{x^2 + y^2}} \cdot b \right] \right] \right]^3} \right]; \quad (2.5,a)$$

$$\lambda = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right); \quad (2.5,б)$$

$$h = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\cos \varphi} - \frac{a}{\sqrt{1 - \left(\frac{a^2 - b^2}{a^2} \right) \cdot [\sin \varphi]^2}}. \quad (2.5,B)$$

Эллипсоидные координаты можно конвертировать в Декартовы.

$$x = \left[\frac{a}{\sqrt{1 - \left(\frac{a^2 - b^2}{a^2} \right) \cdot [\sin \varphi]^2}} + h \right] \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda; \quad (2.6,a)$$

$$y = \left[\frac{a}{\sqrt{1 - \left(\frac{a^2 - b^2}{a^2} \right) \cdot [\sin \varphi]^2}} + h \right] \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda; \quad (2.6,б)$$

$$z = \left[\frac{a}{\sqrt{1 - \left(\frac{a^2 - b^2}{a^2} \right) \cdot [\sin \varphi]^2}} \left[1 - \left(\frac{a^2 - b^2}{a^2} \right) \right] + h \right] \cdot \sin \varphi. \quad (2.6,B)$$

2.3 Время прохождения сигнала

Системы спутниковой навигации используют высокоорбитальные спутники, которые размещаются таким образом, чтобы в любой точке на земной поверхности были видны не менее 4-х спутников. Каждый спутник на борту имеет атомные часы и передает свою точную позицию и точное время на Землю. Спутниковые сигналы передаются со скоростью света и, следовательно, потребуется приблизительно 63.3 м.сек. для достижения земной поверхности прямо под спутником. Для того чтобы приемник пользователя определил свою позицию на земной поверхности, он должен получать сигналы времени от четырех спутников для вычисления транзитного времени сигнала $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \Delta t_4$ (рис. 2.8). Расстояние (диапазон пользователя) до четырех спутников R_1, R_2, R_3, R_4 может быть определено с помощью транзитного времени сигналов $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \Delta t_4$ между ними и пользователем. Так как позиции спутников известны $X_i, Y_i, Z_i, i=1, 2, 3, 4$, нетрудно вычислить позицию пользователя.

Все спутниковые часы скорректированы или синхронизированы одним с другими и с универсальным временем и поэтому время передачи сигналов со спутника известно с большой точностью. Часы пользователя не синхронизированы и идут медленнее или быстрее на величину Δt_0 . Ошибка времени Δt_0 является причиной погрешности измерения транзитного времени Δt_i и расстояния $R_i, i=1, 2, 3, 4$. Если транзитное время имеет ошибку 1 н.сек., то позиционная ошибка составит 300 м. В результате получается неправильное расстояние, известное под названием псевдо-расстояния или псевдо-диапазона (PSR): $PSR_i = (\Delta t_i + \Delta t_0) \cdot c = R_i + \Delta t_0 \cdot c$.

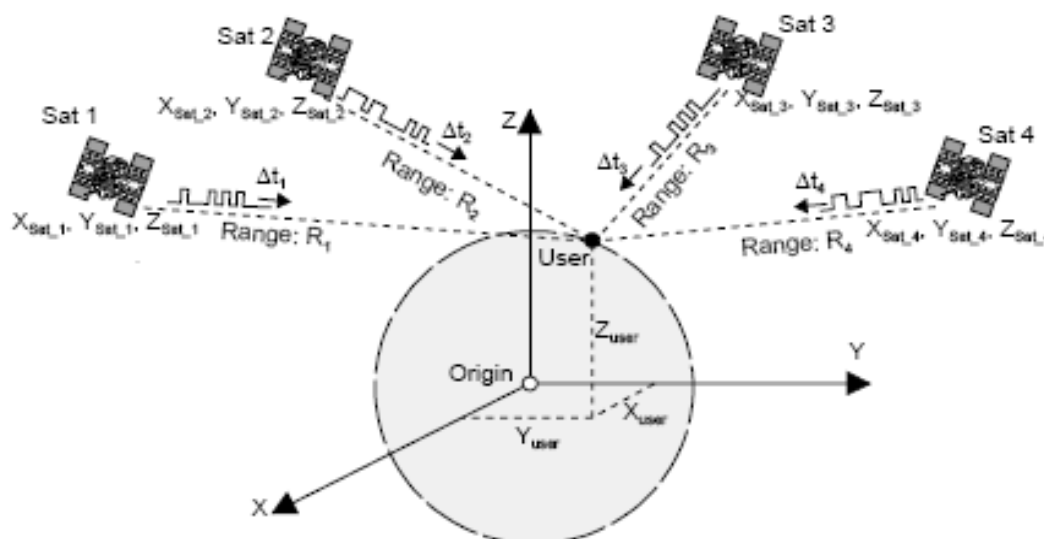


Рис. 2.7. Трехмерная координатная система.

Далее рассмотрим возможные методы определения пространственных координат потребителя.

2.4 Методы определение местоположения

Дальномерный метод. В большинстве применений СРНС можно считать, что потребитель находится на поверхности Земли. Условно примем форму Земли за идеальную сферическую. Тогда на рис. 2.3 сферу с радиусом R можно считать земной поверхностью с центром масс в точке O , а сферу с радиусом R_i , поверхностью положения, образованной вокруг НКА с центром масс в точке O_i . Уравнение сферы имеет вид:

$$R_i = \sqrt{x_i^2 - x^2 + y_i^2 - y^2 + z_i^2 - z^2}, \quad (2.7)$$

где R_i - дальность между i -м НКА и потребителем; x_i, y_i, z_i - известные на момент измерения координаты НКА; x, y, z - координаты потребителя.

Пространственные координаты потребителя находят в точке пересечения трех поверхностей положения, описываемых уравнением (2.7). Для наземного потребителя линия положения в случае с одним НКА представляет собой окружность на поверхности Земли. В случае с двумя НКА наземный потребитель может находиться в одной из двух точек, образованных при пересечении двух окружностей. Возникает неоднозначность, которая может быть устранена знанием ориентировочных координат потребителя. Если ориентировочные координаты неизвестны, неоднозначность устраняется измерением дальности до третьего НКА.

Таким образом, для определения координат потребителя *на поверхности* Земли, при условии абсолютной неизвестности предварительных координат, необходимо измерение как минимум трех дальностей до НКА.

В общем случае, когда высота потребителя над поверхностью Земли неизвестна, земная поверхность не может быть принята за одну из поверхностей положения. Тогда в случае со знанием предварительных координат требуется измерение дальностей минимум до трех спутников; в случае с абсолютной неизвестностью предварительных координат необходимо измерение дальностей до *четырех* спутников.

Если учесть, что некоторые спутники в разные моменты времени могут находиться близко к линии радиогоризонта, что чрезвычайно невыгодно с точки зрения приема радиосигнала и точности измерений, либо быть неисправны, то становится очевидной необходимость нахождения в зоне видимости потребителя как минимум (5 - 6) НКА, что и обуславливает существующую орбитальную структуру СНС. Меньшее количество видимых НКА снижает доступность, целостность и непрерывность навигационного поля СНС.

В уравнениях (2.7) неявно подразумевается, что все величины взяты в один момент времени, но координаты спутника определены в системной шкале времени, а задержки сигнала и координаты потребителя вычисляются в шкале времени потребителя. При расхождении шкал времени на величину Δt возникает погрешность измерения дальности $\Delta R = c \cdot \Delta t$, приводящая к возрастанию погрешности местоопределения. Приблизить синхронизацию шкал к идеальной можно при помощи использования потребителем эталона времени и частоты, периодически сверяемого с системной шкалой. На практике этот метод нереализуем для большей части потребителей из-за сложности и дороговизны оборудования и применяется лишь на некоторых контрольных и дифференциальных наземных станциях.

Псевдодальномерный метод. Расхождение шкал Δt на время проведения измерений можно считать постоянной величиной. Поэтому при измерении дальности до i -того НКА получают *псевдодальность* $R_i' = R + \Delta R$, отличающуюся от истинной дальности R_i , на постоянную величину $\Delta R = c \cdot \Delta t$. Уравнение для псевдодальности приобретает вид:

$$R_i' = \sqrt{x_i^2 - x^2 + y_i^2 - y^2 + z_i^2 - z^2} + \Delta R. \quad (2.8)$$

Как и в дальномерном методе, поверхностью положения является сфера с центром в центре масс НКА, но радиус этой сферы изменен на неизвестную величину ΔR . Для определения координат потребителя необходимо решить задачу с четырьмя неизвестными $x, y, z, \Delta R$. Следовательно, для решения системы уравнений в псевдодальномерном методе необходимо измерить псевдодальности минимум до четырех спутников. При этом по-прежнему возникает пространственная неоднозначность, которую стараются исключить при помощи априорного знания или предвычисления координат, в противном случае потребовалось бы измерение псевдодальностей до пяти НКА, что не всегда осуществимо на практике. Жёсткие требования, предъявляемые псевдодальномерным методом к количеству наблюдаемых спутников, реализуются только в современных СРНС.

Очевидно, что при нахождении постоянной погрешности $\Delta R = c \cdot \Delta t$ потребитель одновременно находит и величину расхождения Δt , что позволяет ему синхронизировать свою шкалу времени с системной. Благодаря этой возможности значительно упрощается аппаратура потребителя, что и обусловило преимущественное применение псевдодальномерного метода.

Разностно-дальномерный метод. Разностно-дальномерный метод основывается на измерении разности дальностей от потребителя до одного или нескольких НКА, и по сути своей аналогичен псевдодальномерному методу,

поскольку в результатах измерения так же присутствует неизвестная постоянная величина ΔR . Представим систему уравнений (2.8) в виде

$$\Delta R_{j1} = \sqrt{\left(x_j - x\right)^2 + \left(y_j - y\right)^2 + \left(z_j - z\right)^2} - \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}, \quad (2.9)$$

где $j = 2, 3, 4$; ΔR_{j1} - измеренная разность дальностей между потребителем и двумя НКА (j -м и первым).

Как видно, разностно-дальномерный метод использует три разности $\Delta R'_{ij} = R'_i - R'_j$, вычисленные для четырех спутников, так как в этом выражении величина ΔR , входящая в состав R'_i и R'_j , постоянная и уничтожается при вычитании. Следовательно, вычисление разностей псевдодальностей равносильно вычислению разностей истинных дальностей. В данном случае поверхность положения представляет собой двуполостной гиперболоид вращения, фокусами которого являются центры масс i -го и j -го НКА.

Недостатком метода является невозможность определения смещения шкалы времени потребителя.

Кроме описанных методов решения навигационной задачи, существуют следующие методы:

- радиально-скоростной (доплеровский);
- псевдо радиально-скоростной;
- разностно-радиально-скоростной;

Радиально-скоростной метод основан на измерении трех радиальных скоростей перемещения НКА относительно потребителя. Физическую основу метода составляет зависимость радиальной скорости точки относительно НКА от координат и относительно скорости НКА.

Псевдо радиально-скоростной метод позволяет определять вектор скорости потребителя при наличии неизвестного постоянного смещения частоты сигнала.

Разностно-радиально-скоростной метод заключается в определении трех разностей $\Delta R_{ij} = R_i - R_j$, где точкой обозначены производные от дальности по времени. Разности могут вычисляться относительно одного или различных НКА. Достоинством метода при определении составляющих скорости потребителя является его независимость от нестабильности эталонов частоты, а недостатком - невозможность определения этой нестабильности.

3 МОДУЛЯЦИОННЫЕ ФОРМАТЫ СИГНАЛОВ И СТРУКТУРА НАВИГАЦИОННЫХ СООБЩЕНИЙ

3.1 Навигационные радиосигналы в системе ГЛОНАСС

3.1.1 Синхронизация кодовых последовательностей и метки времени

Для приема спутниковых навигационных сигналов необходимо реализовать когерентный прием сигнала, т. е. использовать фазовую синхронизацию, которая осуществляется путем использования системы слежения за фазой сигнала.

При демодуляции передаваемых данных приемник должен с достаточной точностью определить границы символов в принятом потоке данных. Другими словами, генератор локального приемника должен быть соответствующим образом синхронизирован с принятым потоком данных. Для демодуляции двоичных символов навигационного сообщения в приемнике необходимо выделить импульсы символьной (тактовой) частоты, определяющие границы принимаемых символов, т. е. осуществить тактовую синхронизацию. Ввиду случайного характера передаваемой информации спектр радиосигнала не содержит составляющей тактовой частоты. Поэтому информацию о тактовой частоте можно выделить только из сигнала, в котором модулирующие посылки меняют свое значение, т. е. при смене принимаемых символов от 0 к 1, и наоборот. Так как смена 0 и 1 имеет неравномерное распределение, то могут появиться длительные интервалы времени, когда отсутствует смена значений символов. При этом время установления тактовой синхронизации может существенно возрасти.

Для устранения этого явления можно использовать дополнительный синхрокод, который складывается по $\text{mod } 2$ с символами навигационных данных. В СРНС в качестве такого кода используется бидвоичный (манчестерский) код (М-код) с длительностью посылки $T_c = 10$ мс. Благодаря бидвоичному кодированию всегда осуществляется практически равномерное распределение переходов от 1 к 0 и, наоборот. В спектре принимаемого сигнала выделяются компоненты с частотой бидвоичного кода. Частотная фильтрация этих спектральных составляющих позволяет облегчить условия и уменьшить время установления тактовой синхронизации в приемнике.

Диаграммы формирования символов навигационной информации, кода $D1$ и кода метки времени приведены на рис. 3.1.

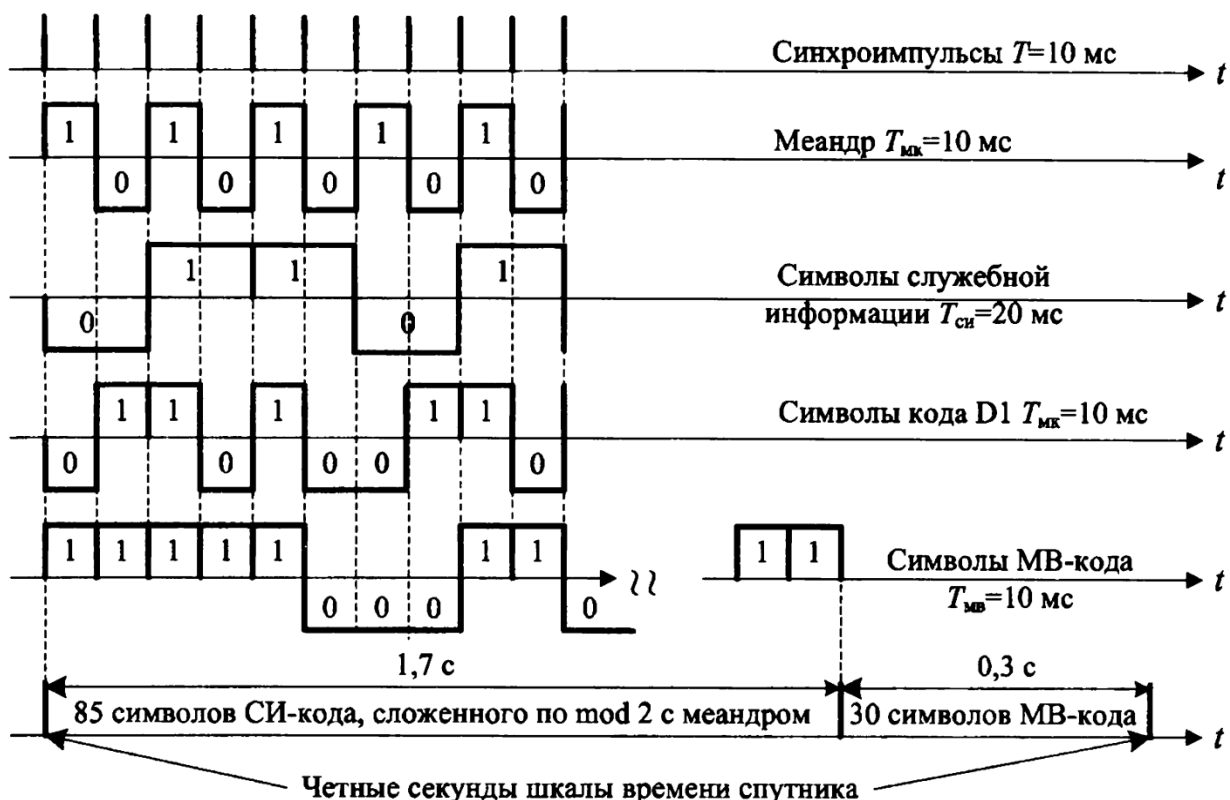


Рис. 3.1. Диаграммы формирования символов навигационной информации, кода $D1$ и кода метки времени.

Кроме тактовой синхронизации в приемнике необходимо определить границы кодовых слов или некоторой совокупности (блоков) слов, т. е. осуществить цикловую синхронизацию. В СРНС в качестве таких блоков приняты строки навигационного сообщения. Цикловую синхронизацию обеспечивают с помощью специальных синхросигналов, которые в аппаратуре спутниковой навигации получили название «код метки времени».

Код метки времени (МВ-код, ПСПМВ) представляет собой укороченную M - последовательность длиной 30 символов длительностью символа 10 мс. ПСПМВ описывается порождающим полиномом $g_{\text{МВ}} \quad x = 1 + x^3 + x^5$ и имеет вид: 11111000110111010100001001017.

При помощи этой метки осуществляется синхронизация по строкам навигационного сообщения и устраняется возможная неоднозначность дальномерных измерений. Первым символом в каждой строке всегда является "0", Он не относится к навигационным данным, но дополняет укороченную ПСПМВ предыдущей строки до полной (не укороченной).

Поскольку все сигналы тактируются от одного опорного источника, то в излучаемом радиосигнале границы строк, границы символов цифровой информации, границы символов меандра, символов ПСПМВ синхронизированы между собой.

3.1.2 Формирование навигационного сообщения

Навигационное сообщение (иначе именуемое кодом служебной информации или СИ-кодом) представляет собой преобразованную цифровую последовательность навигационных данных, передаваемых потребителям СРНС.

Временные соотношения между синхроимпульсами навигационного сообщения (НС) и дальномерным СТ-кодом приведены на рис. 3.2.

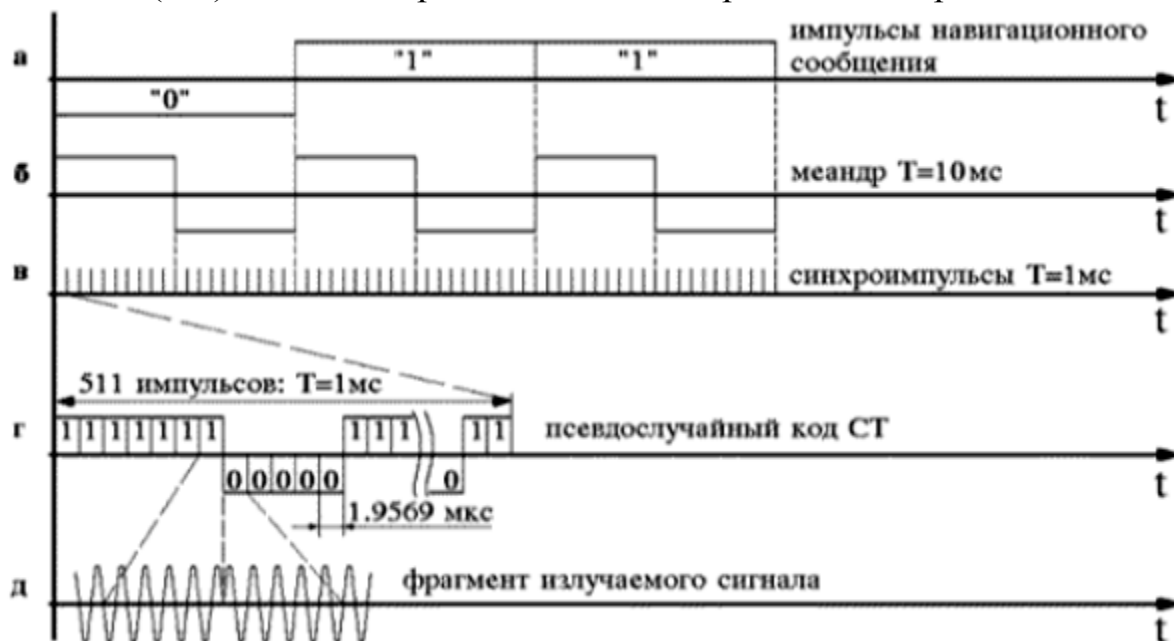


Рис. 3.2 Диаграмма формирования навигационного сообщения

Навигационные данные кодируются помехоустойчивым кодом Хэмминга (85,77) с кодовым расстоянием, равным четырем. Длительность информационных символов $T_{\text{си}} = 20$ мс. В канале передачи используется сигнал с относительной фазовой манипуляцией, исключаяющий явление обратной работы фазового детектора. Дальномерный СТ-код длительностью $T_{\text{ст}} = 1$ мс представляет собой M - последовательность длиной 511 символов. Порождающий полином формируемой последовательности имеет вид $g_{\text{ст}} x = 1 + x^5 + x^9$. Эта длина сравнительно невелика, но обеспечивает быстрое вхождение в режим захвата и приемлемую точность измерения дальности.

Схема, поясняющая принцип формирования дальномерного кода ПСПД и различных синхроимпульсов, показана на рис. 3.3.

- кода метки времени (ПСПД или МВ-кода) с тактовой частотой 100 Гц, длины 32 символа.

Все кодовые последовательности тактируются от одного опорного источника, и поэтому границы символов навигационной информации, символов меандра, символов ПСПМВ и ПСПД дальномерного кода синхронизированы между собой.

Путем инвертирования ПСПМВ передаются метки времени (МВ) бортовой шкалы времени НКА и двоичные символы информации (СИ). Путем инвертирования ПСПД передаются двоичные символы информации СИ длительностью 20 мс.

Упрощенная схема формирования модулирующей последовательности в ГЛОНАСС показана на рис. 3.4.

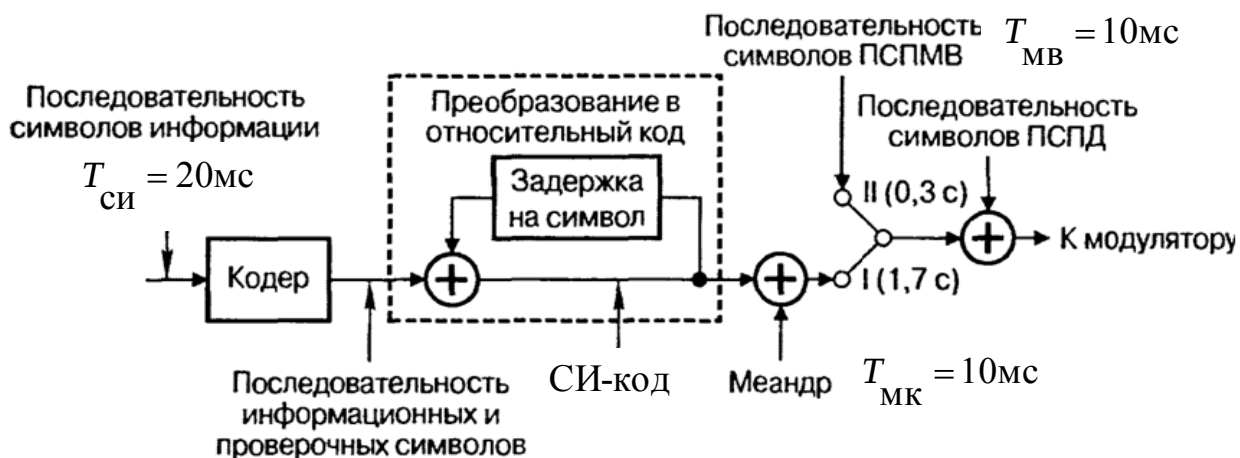


Рис. 3.4. Схема формирования модулирующих последовательностей СРНС ГЛОНАСС

Двоичная последовательность навигационного сообщения (D1-код), содержащая информационные и проверочные символы в так называемом бидвоичном коде, образуется после сложения по mod 2 последовательности символов в относительном коде (СИ-код) с меандровым колебанием (М-код). М-код обеспечивает, в частности, простоту синхронизации по СИ-коду, содержащему серии одинаковых двоичных символов (нулей и единиц).

Информационная строка длительностью 2 сек. (100 бит) разделена на две части. В первой части строки (1.7 сек.) содержится навигационная информация (85 бит), преобразованная в относительный код и сложенная по mod 2 с меандровым колебанием (код D1). Во второй части строки (0.3 сек.) в качестве последовательности навигационных данных используется ПСПМВ (МВ-код), состоящая из 30 символов длительностью 10 мс.

Результирующая двоичная последовательность поступает на модуляцию несущего колебания.

3. 1.4 Структура навигационных сообщений в системе ГЛОНАСС

Навигационные сообщения спутников системы Глонасс необходимы потребителям для навигационных определений и планирования сеансов связи со спутниками. По своему содержанию навигационные сообщения делятся на оперативную и неоперативную информацию.

Оперативная информация относится к спутнику, из сигнала которого она была получена. К оперативной информации относят:

- оцифровку меток времени;
- сдвиг шкалы времени спутника относительно шкалы системы;
- относительное отличие несущей частоты спутника от номинального значения;
- эфемеридная информация.

Время привязки эфемеридной информации и частотно-временные поправки позволяют точно определять географические координаты и скорость движения спутника.

Неоперативная информация содержит альманах, включающий:

- данные о состоянии всех спутников системы;
- сдвиг шкалы времени спутника относительно шкалы системы;
- параметры орбит всех спутников системы;
- поправку к шкале времени системы Глонасс.

Выбор оптимального "созвездия" КА и прогноза доплеровского сдвига несущей частоты обеспечивается за счёт анализа альманаха системы.

Навигационное сообщение СРНС ГЛОНАСС иерархически структурировано в виде *строк, кадров и суперкадров*.

Строка навигационного сообщения обладает длительностью 2 сек. В первой части строки в течение 1,7 сек. передаются символы навигационного сообщения. Во второй части строки в течение 0,3 сек. передаются символы метки времени. Навигационное сообщение содержит 85 двоичных символов, передаваемых в относительном коде. Первый символ является холостым для относительного кода. Последние восемь символов в каждой строке являются проверочными символами кода Хэмминга.

Кадр сообщения имеет длительность 30 сек. и состоит из 15 строк длительностью 2 сек. каждая. Он содержит полный объем оперативной информации для излучающего НС. В кадрах передается альманах по спутникам. Альманах для каждого спутника занимает по две строки.

Суперкадр сообщения содержит 5 кадров и длится 2,5 мин. В пределах суперкадра передается оперативная информация и строка 5 (системные данные) повторяются в каждом кадре.

Границы строк, кадров и суперкадров различных НС синхронны с погрешностью не более 2 мс.

Допускаются следующие погрешности привязки и синхронизации:

- точность взаимной синхронизации бортовых шкал времени НС составляет 20 нс.;
- расхождение между шкалой системного времени ГЛОНАСС и шкалой Госэталона Координированного всемирного времени не более 1 мс;
- погрешность сверки шкалы времени НС со шкалой времени Центрального синхронизатора - не более 10 нс.

Шкала Координированного всемирного времени UTC подвергается периодической плановой коррекции на целое число секунд. Синхронно с этим событием производится коррекция системного времени ГЛОНАСС. При коррекции системного времени ГЛОНАСС метка времени строки навигационного кадра, передаваемая каждые 2 с, изменяет свое положение на непрерывной шкале времени для достижения синхронизма с 2-секундной эпохой скорректированной шкалы UTC.

3.2 Навигационные радиосигналы в системе GPS

3.2.1 Формат модулирующих последовательностей

Передача спутниковых сообщений организована методом прямого расширения: поток бит данных со скоростью 50 бит/сек непосредственно бинарно-манипулирует последовательность Голда. Таким образом, любой бит данных занимает интервал, равный 10 периодам последовательности Голда, что нейтрализует ухудшение их корреляционных свойств вследствие манипуляции данными. Для более надежной передачи поток данных кодируется кодом Хэмминга (32,26).

Упрощенная схема формирования навигационных модулирующих сигналов в системе GPS приведена на рис 3.4.

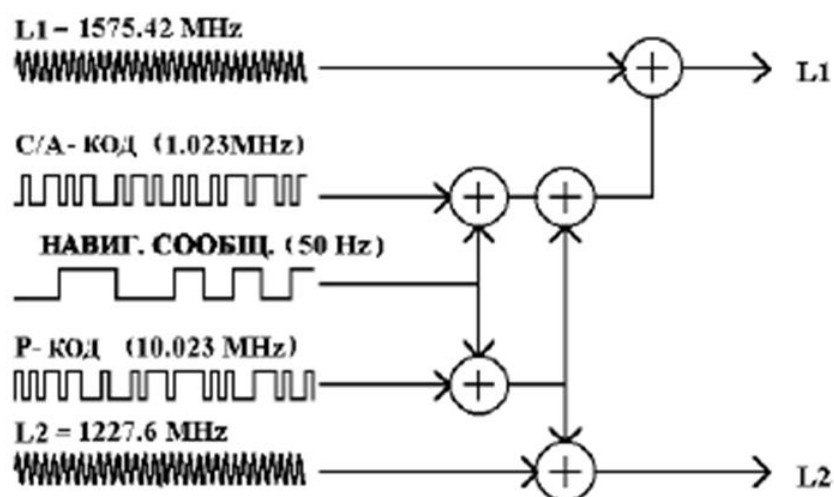


Рис. 3.4. Схема формирования навигационных радиосигналов в системе GPS

P-код аналогично C/A-коду также модулируется потоком бит данных.

Приняв сигнал любого спутника, потребитель получает доступ к грубому положению других и может использовать эту информацию для ускорения процедуры поиска сигналов других спутников.

Как видно из схемы, навигационный радиосигнал на верхней несущей частоте $L1$ является двухкомпонентным. Он содержит два фазоманипулированных навигационных радиосигнала в квадратуре (сдвиг по фазе на $\pm 90^\circ$): узкополосный и широкополосный. Р-код передается на обеих частотах $L1$ и $L2$.

Навигационный радиосигнал $L2$ - однокомпонентный и образован посредством манипуляции фазы несущего колебания на 180° периодической ПСП сверхбольшого периода. Этот сигнал предназначен для использования военными пользователями.

3.2.2 Структура навигационного сообщения в системе GPS

Данные в системе GPS передаются по каналам со скоростью 50 бит/с, независимо от применяемых псевдослучайных дальномерных кодов.

Структурными единицами сообщения являются: *страницы, кадры, подкадры и слова*.

Структура навигационного сообщения с длиной кадра 1500 бит, разбитого на 5 подкадров по 300 бит. Каждый подкадр содержит 10 слов по 30 бит. Подкадры с 1 по 3 имеют постоянные источники информации. Подкадры 4 и 5 в процессе передачи навигационного сообщения подкоммутируются к различным источникам данных, образуя 25 уникальных комбинаций. Таким образом, для передачи законченного навигационного сообщения необходимо 25 полных кадров.

В каждом из этих 25 кадров подкадры 4 и 5 имеют различное информационное наполнение, поэтому принято говорить, что они образуют 25 *страниц (с номерами от 1 до 25)*.

Системное время GPS соотносится со шкалой Координированного всемирного времени UTC (USNO). Наибольшей единицей измерения времени GPS считается неделя, содержащая 605.800 сек. Погрешность привязки шкалы GPS к шкале UTC не превышает 1 мкс.

Навигационное сообщение содержит данные для привязки системного времени к UTC в приемном устройстве пользователя. Точность этих данных в интервале передачи выдерживается такой, что обеспечивает привязку системного времени GPS не менее 90 нс.

4 ПОИСК И СЛЕЖЕНИЕ ЗА СПУТНИКОВЫМИ СИГНАЛАМИ

Одной из наиболее характерных задач в системах спутниковой навигации является измерение времени прихода и частоты принятого сигнала.

На практике процедуры частотно-временного оценивания в широкой области неопределенности часто реализуются в виде двух последовательных этапов. Первый из них, называемый *поиском* (поиском кода), производит грубое измерение необходимых параметров и обеспечивает предварительными оценками, используемыми на втором этапе, называемом *слежением*. Этот второй этап, обычно выполняемый специальными схемами слежения за кодом и частотой, обеспечивает точными частотно-временными оценками, которые в дальнейшем непосредственно используются местным опорным генератором.

Будем трактовать неизвестные задержку τ и частотный сдвиг F сигнала как сигнальные координаты на частотно-временной плоскости, представленной на рис. 4.1.

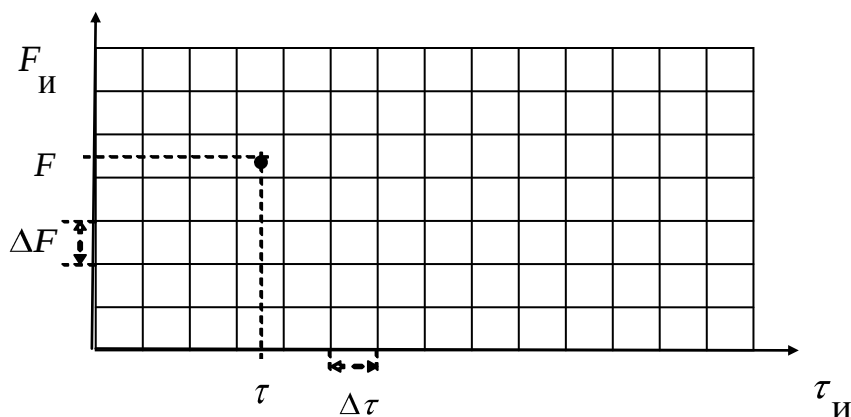


Рис. 4.1. Частотно-временная плоскость поиска сигнала

Предположим, что диапазоны начальной неопределенности по параметрам поиска τ и F составляют τ_i и F_i соответственно. Тогда частотно-временная плоскость будет иметь $M = F_i \times \tau_i / \Delta F \times \Delta \tau$ прямоугольных ячеек размера $\Delta \tau \times \Delta F$. Процедура поиска должна определить, в какой из M ячеек содержится сигнал.

4.1 Процедура последовательного поиска

При *последовательном поиске* в каждый момент времени анализируется только одна ячейка, т.е. вычисляется единственная корреляция наблюдения и локальной сигнальной копии, характеризующейся некоторыми конкретными значениями сдвига по времени и частоте. Затем величина корреляции анализируется с целью принятия решения об истинности или ложности данной ячейки.

При принятии решения могут использоваться различные критерии. Например, поиск может продолжаться до тех пор, пока все ячейки внутри области неопределенности (см. рис. 4.4) не будут проанализированы, причем в

течение анализа запоминаются: максимальное значение корреляции на текущий момент времени и соответствующие ей значения τ и F . Затем, после анализа последней ячейки, автоматически становится известной ячейка, признанная истинной, поскольку ее координаты хранятся в памяти, а процедура поиска завершается простым их считыванием.

Более типичной для реальных приемников является другая версия последовательного поиска, когда найденное в текущий момент значение корреляции только сравнивается с порогом. Если значение корреляции превышает порог, то принимается решение, что текущая ячейка является истинной и поиск заканчивается. В противном случае поисковая система анализирует следующую ячейку и так далее.

С точки зрения анализа выполнения неважно, сколько параметров неизвестно и должно быть оценено в ходе поиска: одновременно время и частота, либо что-то одно из них. Существенным является только общее число анализируемых ячеек. Для большей прозрачности дальнейших обсуждений будем полагать, что процедура поиска заключается только в измерении временного запаздывания принятого сигнала, тогда, как значение частоты априори известно, с достаточной точностью.

В случае периодичности кода максимальная область неопределенности по времени может простираться только на один период, а все большие задержки приводятся к одному периоду. В свете этого совершенно оправдано использование термина «фазы» как синонима задержки периодического кода, а переход от одной ячейки к следующей в области неопределенности означает просто изменение фазы местной копии кода.

На рис. 4.2 представлена структура устройства, осуществляющего последовательный поиск в рассматриваемых условиях.

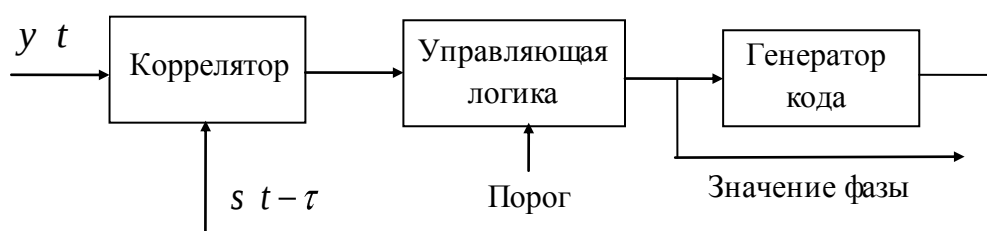


Рис. 4.2. Структура устройства последовательного поиска

Если текущее значение корреляции ниже порога, то управляющая поиском логика предписывает местному генератору увеличить фазу кодовой копии $s t - \tau$ на его выходе на один чип или часть чипа, а устройство переходит к анализу следующей ячейки. Если же текущая корреляция превышает порог, то логика управления сигнализирует об окончании поиска, а генератор сохраняет фазу кода, отвечающую ячейке, которая признана истинной.

Одной из возможных ошибок является ложная тревога, т.е. принятие пустой ячейки за истинную. В этом случае процедура поиска завершится в ложном месте и совершенно естественно стремление удержать вероятность

подобного события на достаточно низком уровне. С другой стороны, с ненулевой вероятностью анализ в истинной ячейке также может завершиться неправильным решением: пропуском сигнала и переходом в следующую (пустую) ячейку, которая уже была проанализирована ранее.

Указанное событие делает процедуру поиска циклической: если поиск не заканчивается при первом прохождении области неопределенности, то производится второе прохождение и т.д., причем каждый из последовательных повторов инициирует новый *цикл*.

Естественно, что среднее время завершения поиска растет с увеличением числа тестируемых ячеек M .

4.2 Методы ускорения поиска

В СРНС каждый из спутников передает данные о текущем и предсказуемом положении всего космического созвездия, которое запоминается в приемнике пользователя. Благодаря этой информации пользователь после захвата сигнала любого спутника и зная его приблизительное положение, может заранее вычислить с некоторой точностью фазы кодов других видимых спутников, существенно сократив область неопределенности их поиска.

Однако неизбежны сценарии, когда область неопределенности настолько обширна, что может потребовать недопустимо большого времени завершения поиска при проведении обычного последовательного поиска, рассмотренного выше. Среди прочих подобная ситуация характерна для этапа инициализации приемника (его первого включения), когда собственный эталонный генератор имеет произвольный сдвиг по отношению к системному времени, а для уменьшения области поиска не могут быть использованы априорные сведения.

Очевидным ресурсом ускорения поиска является применение нескольких параллельных корреляторов, каждый из которых работает автономно и сканирует отдельную часть области неопределенности. В этом случае исходная область неопределенности просто разбивается на n_c подобластей, каждая из которых охватывает M/n_c ячеек, где n_c - число параллельных каналов, и время поиска соответственно уменьшается.

4.3 Слежения за задержкой сигналов

Сосредоточим основное внимание на точном измерении задержки (фазы кода) принимаемого сигнала. Для быстрейшего понимания упростим задачу, сведя ее к оцениванию задержки модулирующего сигнала, не учитывая влияние случайности фазы. Предположим, что τ является неизвестной задержкой модулирующего сигнала $s(t)$. Тогда оптимальный измеритель должен формировать оценку $\hat{\tau}$ этого параметра как его значение, максимизирующее

корреляцию $z \tau$ между опорной сигнальной копией $s t - \tau$ и наблюдением $y t$.

Одним из путей аппаратной реализации данного алгоритма служит набор корреляторов, непосредственно вычисляющих функцию $z \tau$ в M точках. Другим является структура с согласованным фильтром, воспроизводящая $z \tau$ в реальном времени. Однако оба варианта сложны в технической реализации устройства слежения за задержкой.

Рассмотрим систему слежения за задержкой сигнала с ранне-поздним дискриминатором

Пусть дискретный сигнал имеет длину N с длительностью чипов Δ . Положим, что время интегрирования простирается на целое число l периодов сигнала: $T = l \cdot N \cdot \Delta$. Тогда функция $\rho(\tau)$ будет обладать свойствами периодической АКФ. Если $s(t)$ является бинарной M -последовательностью с прямоугольными чипами, то ее нормированная периодическая АКФ $\rho(\tau)$ имеет вид, представленный на рис. 4.3.

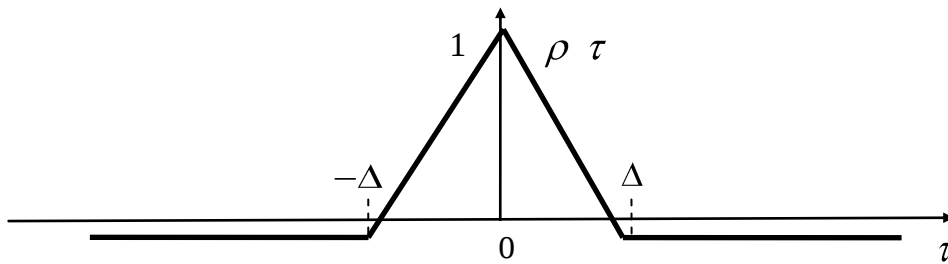


Рис. 4.3. АКФ дискретного сигнала

Первым элементом в структуре *петли захвата по задержки* является дискриминатор, т.е. комбинация из коррелятора и опоры, формирующая сигнал ошибки $e(\hat{\tau})$. В одной из классических схем дискриминатора для модулирующего сигнала $s(t)$ в качестве опоры $s_r(t)$ берется разность двух сдвинутых по времени копий сигнала: запаздывающей $s(t - \delta / 2)$ и опережающей $s(t + \delta / 2)$, где δ определяет их временное разнесение. Тогда полезный компонент сигнала ошибки, обусловленный рассогласованием $\varepsilon = \hat{\tau} - \tau$ опоры и принятого сигнала, может быть записан в виде

$$\begin{aligned} \overline{e(\hat{\tau})} &= \int_0^T s(t - \tau) \cdot s_r(t - \hat{\tau}) dt = \int_0^T s(t - \tau) \cdot \left[s\left(t - \hat{\tau} - \frac{\delta}{2}\right) - s\left(t - \hat{\tau} + \frac{\delta}{2}\right) \right] dt = \\ &= [\rho(\varepsilon + \delta/2) - \rho(\varepsilon - \delta/2)], \end{aligned} \quad (4.1)$$

где $\rho(\tau)$ - нормированная АКФ сигнала на временном интервале $[0, T]$.

Опережающая и запаздывающая копии $\rho(\tau)$, входящие в выражения (4.1), показаны на рис. 4.4 пунктирными линиями. Разность

$\overline{e(\hat{\tau})} = \rho \varepsilon + \delta/2 - \rho \varepsilon - \delta/2$, называемая дискриминационной кривой, представлена на этом рисунке сплошной линией.

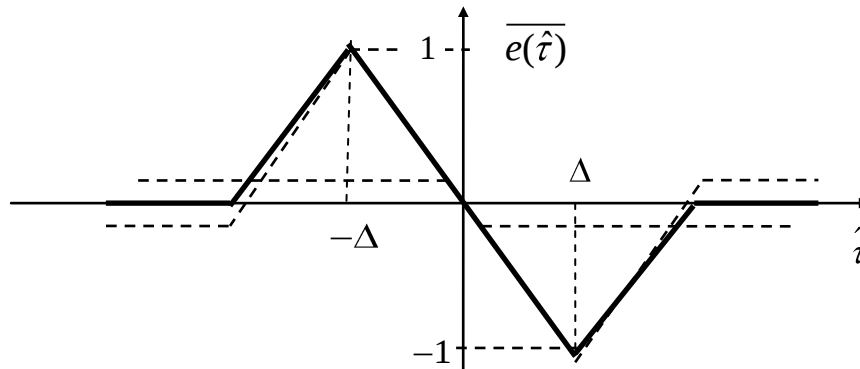


Рис. 4.4. Дискриминационная характеристика

Рассматриваемый дискриминатор порождает положительный или отрицательный сигнал ошибки, предоставляя возможность ГУН-у изменить собственную частоту и, тем самым, сдвинуть опору в соответствующем направлении.

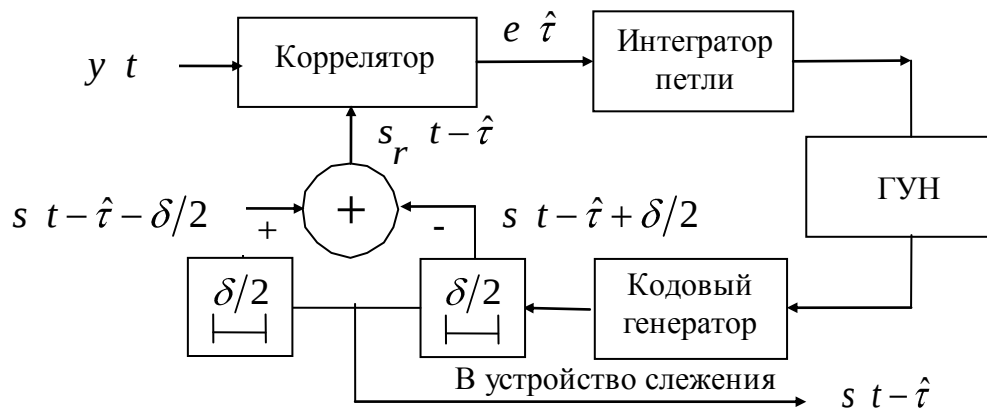


Рис. 4.5. Схема слежения за задержкой сигнала

На рис. 4.5 представлена структура системы слежения за задержкой сигнала с использованием ранне-позднего дискриминатора.

Кодовый генератор, управляемый ГУНом, формирует опережающую сигнальную копию $s(t + \delta/2)$, которая, задержанная на δ , дает запаздывающую копию. Их разность подается на коррелятор в качестве опорного сигнала. Кодовая копия $s(t)$, синхронизированная с входным сигналом, может быть получена в результате задержки на $\delta/2$ опережающей копии.

5 ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЕ КОДИРОВАНИЕ СООБЩЕНИЙ

В СРНС навигационное сообщение передается в виде потока слов цифровой информации (ЦИ). С целью повышения достоверности приема навигационных данных по каналу связи используют помехоустойчивое кодирование.

При кодировании информации исходные данные делятся на блоки из k бит, которые называют информационными битами, или битами сообщения. К каждому блоку данных кодирующее устройство прибавляет $r = n - k$ бит, которые называются *избыточными битами*, *битами четности*, или *контрольными битами*.

В процессе кодирования каждый k -битовый блок данных $m = m_1, m_2, \dots, m_k$ преобразуется в больший блок из n бит, который называется кодовым словом $U = u_1, u_2, \dots, u_n$. Для обозначения описанного кодового слова используется запись n, k . Правила преобразования исходного потока символов в новый поток определяет метод помехоустойчивого кодирования.

Систематический линейный код n, k - это такое отображение k -мерного вектора сообщения $m = m_1, m_2, \dots, m_k$ в n -мерное кодовое слово $U = u_1, u_2, \dots, u_n$, в котором часть формируемой кодовой последовательности совмещается с k символами сообщения. Остальные $n - k$ бит - это биты четности: $p_1, p_2, \dots, p_{n-k}, m_1, m_2, \dots, m_k$. Систематические кодовые слова иногда записываются так, чтобы биты сообщения занимали левую часть кодового слова, а биты четности - правую: $m_1, m_2, \dots, m_k, p_1, p_2, \dots, p_{n-k}$. Такая перестановка не влияет на свойства кода, связанные с процедурами обнаружения и исправления ошибок.

Расстояние между двумя любыми кодовыми комбинациями определяется числом позиций, в которых эти комбинации имеют различные символы. Например, расстояние между комбинациями 0001101 и 1001010 равно $d = 4$. Минимальное расстояние между разрешаемыми комбинациями данного кода $d_{\min}$ называется расстоянием Хэмминга. Минимальное расстояние линейного кода равно наименьшему из весов ненулевых слов кода:

$$d = \min_{U_i \neq 0} w(U_i).$$

Если код используется только для обнаружения ошибок кратностью α , то необходимо и достаточно, чтобы $d_{\min} \geq \alpha + 1$. Для исправления всех ошибок кратности α и менее необходимо иметь $d_{\min} \geq 2\alpha + 1$.

Рассмотрим построение кодов Хэмминга, применяемых в СРНС.

5. 1 Построение кодов Хэмминга

Рассмотрим двоичный линейный код, сконструированный следующим образом. Выпишем все различные ненулевые m -разрядные двоичные числа и используем полученные вектора в качестве столбцов проверочной матрицы, располагая их в порядке возрастания. Построенная таким образом матрица имеет размерность $m \times 2^m - 1$. Принимая во внимание, что число столбцов проверочной матрицы определяет длину кода n , а число строк - количество проверочных символов $r = (n - k)$, то число информационных символов в кодовом слове будет $k = n - m = 2^m - m - 1$. Таким образом, с помощью подобной проверочной матрицы будет сконструирован $2^m - 1, 2^m - m - 1$ линейный код. Кроме того, поскольку все столбцы проверочной матрицы различны, то любая пара столбцов матрицы **H** линейно независима, тогда как каждый из столбцов всегда может быть представлен в виде линейной комбинации двух других. Следовательно, можно утверждать, что кодовое расстояние построенного кода $d = 3$, и он может исправить любую однократную ошибку. Линейные коды, обладающие параметрами

$$n = 2^m - 1, k = 2^m - m - 1, d = 3, \quad (5.1)$$

называются *кодами Хэмминга*.

Код Хэмминга длины $n = 2^m - 1$, содержащий $k = 2^m - m - 1$ информационных символов, исправляет любую однократную ошибку и не исправляет ни одной ошибки большей кратности.

Пример 5.1. Пусть $m = 3$, тогда существует (7,4) код Хэмминга, столбцами проверочной матрицы **H** которого являются числа b от 1 до 7, записанные в двоичной форме 3-х компонентными векторами:

$$\mathbf{H} := \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

В том случае, когда существует необходимость построения кода Хэмминга в систематической форме, единственное, что необходимо сделать - это определенным образом упорядочить столбцы исходной проверочной матрицы, выделив в явном виде $m \times m$ единичную матрицу, как составную часть проверочной:

$$\mathbf{H} := \begin{pmatrix} 7 & 6 & 3 & 5 & 1 & 2 & 4 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Из полученной таким способом матрицы $\mathbf{H}$ легко построить и каноническую порождающую матрицу $\mathbf{G}$. Для этого достаточно выделить из матрицы $\mathbf{H}$ вспомогательную матрицу $\mathbf{P}$ и определить единичную матрицу $\mathbf{I}$ размерности $k \times k$:

$$\mathbf{P}^T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{I} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Порождающая матрица $\mathbf{G}$ получается объединением матриц $(\mathbf{I}:\mathbf{P})$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Значения параметров первых двоичных кодов Хэмминга, определяемые соотношениями (5.1), представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1

n	7	15	31	63	127	...
k	4	11	26	57	120	...
r	3	4	5	6	7	...
R=k/n	4/7	11/15	26/31	57/63	120/127	...

Из данных, приведенных в табл. 5.1, следует, что при $n \rightarrow \infty$ скорость кода $R \rightarrow 1$, следовательно, коды Хэмминга являются высокоскоростными кодами.

5.2 Кодирование и декодирование систематических кодов Хэмминга

Рассмотрим передаваемое сообщение из k бит: $m = m_1, m_2, \dots, m_k$. Тогда, формируемое кодовое слово можно представить в следующем виде $U_j = m_j \cdot G$, $j = 0, 1, \dots, 2^k - 1$. В качестве иллюстрации воспользуемся кодом (7,4) из примера 5.1 и рассмотрим структуру кодовых слов. Соответствие векторов сообщения m и кодовых слов U представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2.

$m_0 = (0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$U_0 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$
$m_1 = (1 \ 0 \ 0 \ 0)$	$U_1 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1)$
$m_2 = (0 \ 1 \ 0 \ 0)$	$U_2 = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1)$
$m_3 = (1 \ 1 \ 0 \ 0)$	$U_3 = (1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0)$
$m_4 = (0 \ 0 \ 1 \ 0)$	$U_4 = (0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0)$
$m_5 = (1 \ 0 \ 1 \ 0)$	$U_5 = (1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)$
$m_6 = (0 \ 1 \ 1 \ 0)$	$U_6 = (0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1)$
$m_7 = (1 \ 1 \ 1 \ 0)$	$U_7 = (1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0)$
$m_8 = (0 \ 0 \ 0 \ 1)$	$U_8 = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1)$
$m_9 = (1 \ 0 \ 0 \ 1)$	$U_9 = (1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0)$
$m_{10} = (0 \ 1 \ 0 \ 1)$	$U_{10} = (0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0)$
$m_{11} = (1 \ 1 \ 0 \ 1)$	$U_{11} = (1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1)$
$m_{12} = (0 \ 0 \ 1 \ 1)$	$U_{12} = (0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1)$
$m_{13} = (1 \ 0 \ 1 \ 1)$	$U_{13} = (1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0)$
$m_{14} = (0 \ 1 \ 1 \ 1)$	$U_{14} = (0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$
$m_{15} = (1 \ 1 \ 1 \ 1)$	$U_{15} = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1)$

Пусть $e = e_1, e_2, \dots, e_n$ - вектор ошибки или модель ошибки, внесенная каналом. Синдром вектора ошибки определяется следующим образом

$$S = e \cdot H^T. \quad (5.2)$$

Модель одиночных канальных ошибок для кода (7,4) из примера 5.1 и синдром вектора ошибок приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3.

$\underline{e}_0 := (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\underline{S}_0 = (0 \ 0 \ 0)$
$\underline{e}_1 := (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\underline{S}_1 = (1 \ 1 \ 1)$
$\underline{e}_2 := (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\underline{S}_2 = (0 \ 1 \ 1)$
$\underline{e}_3 := (0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\underline{S}_3 = (1 \ 1 \ 0)$
$\underline{e}_4 := (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\underline{S}_4 = (1 \ 0 \ 1)$
$\underline{e}_5 := (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0)$	$\underline{S}_5 = (1 \ 0 \ 0)$
$\underline{e}_6 := (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0)$	$\underline{S}_6 = (0 \ 1 \ 0)$
$\underline{e}_7 := (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)$	$\underline{S}_7 = (0 \ 0 \ 1)$

При воздействии канальной помехи вектор принятого сигнала можно представить в следующем виде

$$\underline{U}_r = \underline{U} + \underline{e}. \quad (5.3)$$

Используя уравнения (5.2) и (5.3), мы можем представить синдром вектора принятого сигнала в следующем виде

$$\underline{S}_r = \underline{U}_r \cdot \underline{H}^T = \underline{U} \cdot \underline{H}^T + \underline{e} \cdot \underline{H}^T. \quad (5.4)$$

Для всех элементов набора кодовых слов имеем $\underline{U} \cdot \underline{H}^T = 0$ и поэтому синдром равен

$$\underline{S}_r = \underline{e} \cdot \underline{H}^T = \underline{S}. \quad (5.5)$$

Из сказанного следует, что по вектору принятого сигнала $\underline{U}_r$ можно обнаружить ошибку и установить синдром канальной помехи $\underline{S}$. Затем, используя таблицу соответствия синдромов (табл. 5.3), находим соответствующую модель ошибки, которая является оценкой ошибки (далее будем обозначать ее через $\hat{\underline{e}}$). Затем декодер прибавляет оценку $\hat{\underline{e}}$ к сигнальному вектору $\underline{U}_r$ и оценивает переданное кодовое слово $\underline{U}_s$

$$\underline{U}_s = \underline{U}_r + \hat{\underline{e}} = \underline{U} + \underline{e} + \hat{\underline{e}} = \underline{U} + \underline{e} + \hat{\underline{e}}. \quad (5.6)$$

Если правильно вычислили ошибку: $\underline{e} = \hat{\underline{e}}$, тогда оценка $\underline{U}_s$ совпадает с переданным кодовым словом $\underline{U}$. С другой стороны, если оценка ошибки неверна, декодер неверно определит переданное кодовое слово, и мы получим необнаружимую ошибку декодирования.

Для иллюстрации правила обнаружения и исправления ошибок вновь обратимся к коду (7.4) из примера 5.1. Пусть принято десять передаваемых кодовых слов при воздействии канальной помехи. Значения принятых кодовых слов (левый столбец) и синдрома вектора принятого сигнала (средний столбец)

представлены в таблице 5.4. Используя таблицу соответствия синдромов (табл. 5.3), находим соответствующую модель канальной ошибки, которая представлена в правой части таблицы 5.4.

Таблица 5.4.

$Ur_0 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0)$	$Sr_0 = (0 \ 0 \ 1)$	$e_0 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)$
$Ur_1 = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0)$	$Sr_1 = (1 \ 1 \ 1)$	$e_1 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$
$Ur_2 = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0)$	$Sr_2 = (1 \ 1 \ 1)$	$e_2 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$
$Ur_3 = (0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1)$	$Sr_3 = (1 \ 0 \ 1)$	$e_3 = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$
$Ur_4 = (1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$	$Sr_4 = (1 \ 0 \ 0)$	$e_4 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0)$
$Ur_5 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0)$	$Sr_5 = (0 \ 1 \ 1)$	$e_5 = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$
$Ur_6 = (1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)$	$Sr_6 = (1 \ 0 \ 1)$	$e_6 = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$
$Ur_7 = (0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)$	$Sr_7 = (1 \ 1 \ 1)$	$e_7 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$
$Ur_8 = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)$	$Sr_8 = (0 \ 1 \ 0)$	$e_8 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0)$
$Ur_9 = (1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0)$	$Sr_9 = (1 \ 0 \ 1)$	$e_9 = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$

Затем декодер прибавляет оценку $\hat{e}$ к сигнальному вектору Ur и оценивает переданное кодовое слово Us . Результаты операции декодирования иллюстрирует таблица 5.5.

Таблица 5.5.

$Ur_0 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0)$	$e_0 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)$	$Us_0 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1)$
$Ur_1 = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0)$	$e_1 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$Us_1 = (1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0)$
$Ur_2 = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0)$	$e_2 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$Us_2 = (1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0)$
$Ur_3 = (0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1)$	$e_3 = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$	$Us_3 = (0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1)$
$Ur_4 = (1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$	$e_4 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0)$	$Us_4 = (1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0)$
$Ur_5 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0)$	$e_5 = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$Us_5 = (1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0)$
$Ur_6 = (1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)$	$e_6 = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$	$Us_6 = (1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1)$
$Ur_7 = (0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)$	$e_7 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$Us_7 = (1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)$
$Ur_8 = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)$	$e_8 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0)$	$Us_8 = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1)$
$Ur_9 = (1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0)$	$e_9 = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$	$Us_9 = (1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0)$

Итак, мы показали, что контроль с помощью синдромов, выполняемый как на искаженном кодовом слове, так и на соответствующей модели ошибки, дает один и тот же синдром. Это позволяет применить эффективную процедуру декодирования с исправлением ошибок

5.3 Коды расширения и укорочения.

Одним из альтернативных путей построения новых кодов может служить метод, основывающийся на модификации известных. Существует набор простых преобразований, которые, незначительно изменяя исходный код,

приводят к новому. Если новый код также оказывается линейным, то эти преобразования соответствуют незначительным изменениям порождающей матрицы G . Например, можно добавить в эту матрицу столбец или строку, выбросить из нее столбец или строку, одновременно добавить или выбросить указанные элементы матрицы. Отметим основные преобразования помехоустойчивых кодов:

- *расширение кода* – это увеличение длины кода путем добавления новых проверочных символов, что приводит к возрастанию числа столбцов порождающей матрицы;
- *укорочение кода* – это уменьшение длины кода путем удаления информационных символов, что приводит к уменьшению порождающей матрицы на одно и то же число по обоим размерам;
- *удлинение кода* – это увеличение длины кода путем добавления новых информационных символов, следствием чего является увеличение обоих размеров порождающей матрицы на одно и то же число;
- *выкалывание кода* – это уменьшение длины кода за счет удаления проверочных символов и, следовательно, большего размера порождающей матрицы.

Существуют и другие преобразования помехоустойчивых кодов.

Остановимся более подробно на двух процедурах, связанных с расширением и укорочением кода.

5.3.1. Расширенный код.

Любой линейный (n, k) код U может быть легко расширен до кода U_p с параметрами $(n+1, k)$ путем добавления еще одного проверочного символа, образованного за счет операции общей проверки на четность.

Пусть, например, $U = u_1, u_2, \dots, u_n$ – произвольное кодовое слово исходного (n, k) линейного кода U . Тогда соответствующее ему слово расширенного кода U_p может быть построено по правилу $U_p = u_1, u_2, \dots, u_n, u_{n+1}$, где $u_{n+1} = u_1 + u_2 + \dots + u_n$, причем результат суммирования берется по модулю 2. Очевидно, что для любого кодового слова расширенного кода выполняется соотношение $u_1 + u_2 + \dots + u_n + u_{n+1} \equiv 0$, и, следовательно, его вес будет четным. Тогда при нечетном кодовом расстоянии d исходного кода U минимальное расстояние расширенного U_p увеличится на единицу, став $d' = d + 1$. Таким образом, любой линейный (n, k) код с нечетным d , исправляющий $\alpha = (d-1)/2$ ошибок, может быть трансформирован в расширенный $(n+1, k)$ код, исправляющий ошибки кратности $\alpha = (d-1)/2 = d'/2 - 1$ и обнаруживающий ошибки кратности $\alpha + 1$.

Коды Хэмминга очень продуктивны для иллюстрации описанной выше процедуры. При минимальном весе исходного кода, равном трем, после

расширения получаем $2^m, 2^m - m - 1$ код, исправляющий любую однократную и обнаруживающий любую двукратную ошибки.

Порождающая матрица G_p расширенного кода будет состоять из исходной порождающей матрицы G и дополнительного столбца, образованного общей проверкой на четность строк исходной матрицы G .

Проверочную матрицу H_p расширенного кода можно получить в два этапа преобразования.

1. Добавим в исходную проверочную матрицу H правый столбец из k -нулевых значений и нижнюю строку размерности $(n+1)$, состоящую из единичных значений. В результате получим дополнительную матрицу H_d размерности $(n+1) \times k$.

2. Дополнительная строка расширенной проверочной матрицы H_p образуются суммированием по модулю 2 всех элементов каждого столбца дополнительной матрицы. Таким образом, расширение проверочной матрицы позволяет увеличить количество проверочных символов $r=n-k$.

Пример 5.2. Ранее в примере 5.1 была построена порождающая матрица G кода Хэмминга (7,4). Применяя описанную процедуру расширения, получаем порождающую матрицу G_p для расширенного кода. Результат преобразования приведен в таблице 5.7.

Таблица 5.7.

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad G_p := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

В соответствии с приведенной процедурой, получаем проверочную матрицу H_p для расширенного кода. Процесс преобразования и построения расширенной проверочной матрицы приведен в таблице 5.7.

Таблица 5.7.

$$H_d := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad H_p = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

В качестве иллюстрации процесс кодирования информационных сообщений в соответствии с расширенным кодом (7.4) приведен в таблице 5.7.

Таблица 5.7.

$\mathbf{m}_0 = (0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{U}_0 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$
$\mathbf{m}_1 = (1 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{U}_1 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0)$
$\mathbf{m}_2 = (0 \ 1 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{U}_2 = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1)$
$\mathbf{m}_3 = (1 \ 1 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{U}_3 = (1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1)$
$\mathbf{m}_4 = (0 \ 0 \ 1 \ 0)$	$\mathbf{U}_4 = (0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1)$
$\mathbf{m}_5 = (1 \ 0 \ 1 \ 0)$	$\mathbf{U}_5 = (1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1)$
$\mathbf{m}_6 = (0 \ 1 \ 1 \ 0)$	$\mathbf{U}_6 = (0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0)$
$\mathbf{m}_7 = (1 \ 1 \ 1 \ 0)$	$\mathbf{U}_7 = (1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0)$
$\mathbf{m}_8 = (0 \ 0 \ 0 \ 1)$	$\mathbf{U}_8 = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1)$
$\mathbf{m}_9 = (1 \ 0 \ 0 \ 1)$	$\mathbf{U}_9 = (1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1)$
$\mathbf{m}_{10} = (0 \ 1 \ 0 \ 1)$	$\mathbf{U}_{10} = (0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0)$
$\mathbf{m}_{11} = (1 \ 1 \ 0 \ 1)$	$\mathbf{U}_{11} = (1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0)$
$\mathbf{m}_{12} = (0 \ 0 \ 1 \ 1)$	$\mathbf{U}_{12} = (0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0)$
$\mathbf{m}_{13} = (1 \ 0 \ 1 \ 1)$	$\mathbf{U}_{13} = (1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$
$\mathbf{m}_{14} = (0 \ 1 \ 1 \ 1)$	$\mathbf{U}_{14} = (0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)$
$\mathbf{m}_{15} = (1 \ 1 \ 1 \ 1)$	$\mathbf{U}_{15} = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1)$

Можно проверить, что расширение кодовых слов позволило увеличить расстояние Хэмминга до значения $d = 4$.

Модель канальных ошибок расширенного кода (7.4) и синдром вектора ошибок приведены в таблице 5.9.

Таблица 5.9.

$\mathbf{еош}_0 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_0 = (1 \ 1 \ 1 \ 0)$
$\mathbf{еош}_1 = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_1 = (0 \ 1 \ 1 \ 1)$
$\mathbf{еош}_2 = (0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_2 = (1 \ 1 \ 0 \ 1)$
$\mathbf{еош}_3 = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_3 = (1 \ 0 \ 1 \ 1)$
$\mathbf{еош}_4 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_4 = (1 \ 0 \ 0 \ 0)$
$\mathbf{еош}_5 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_5 = (0 \ 1 \ 0 \ 0)$
$\mathbf{еош}_6 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0)$	$\mathbf{S}_6 = (0 \ 0 \ 1 \ 0)$
$\mathbf{еош}_7 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)$	$\mathbf{S}_7 = (0 \ 0 \ 0 \ 1)$
$\mathbf{еош}_8 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_8 = (0 \ 0 \ 0 \ 0)$
$\mathbf{еош}_9 = (1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_9 = (1 \ 0 \ 0 \ 1)$
$\mathbf{еош}_{10} = (0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_{10} = (1 \ 0 \ 1 \ 0)$
$\mathbf{еош}_{11} = (0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_{11} = (0 \ 1 \ 1 \ 0)$
$\mathbf{еош}_{12} = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_{12} = (0 \ 0 \ 1 \ 1)$
$\mathbf{еош}_{13} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_{13} = (1 \ 1 \ 0 \ 0)$
$\mathbf{еош}_{14} = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0)$	$\mathbf{S}_{14} = (0 \ 1 \ 0 \ 1)$
$\mathbf{еош}_{15} = (0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0)$	$\mathbf{S}_{15} = (1 \ 1 \ 1 \ 1)$

Следует отметить, что расширенный код позволяет обнаруживать и исправлять все одиночные и некоторые двукратные канальные ошибки.

Процедура декодирования и исправления ошибок остается без всяких изменений.

5.3.2. Укороченный код.

Укороченный код формируется из исходного систематического путем выбора только таких кодовых слов, в начале которых стоят l нулевых символов. Поскольку нулевые символы не несут никакой информации, длину кода можно уменьшить на l символов с одновременным сокращением числа информационных символов и кодовых слов. Результирующий $n-l, k-l$ код будет обладать тем же кодовым расстоянием, что и исходный.

Можно показать, что порождающая матрица G_y укороченного кода получается из некоторой матрицы G исходного удалением из нее первых l строк и столбцов. Соответственно проверочная матрица укороченного кода H_y образуется удалением l столбцов из исходной проверочной матрицы H .

Пример 5.3. Обратимся к примеру 5.2 построения расширенного кода Хэмминга (7.4). После удаления одного столбца и одной строки получаем порождающую матрицу G_y укороченного кода, которая представлена в таблице 5.10.

$$G_p = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Таблица 5.10.

$$G_y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Соответствующая укороченная проверочная матрица приведена в таблице 5.11.

$$H_p = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Таблица 5.11.

$$H_y = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

В результате приведенных преобразований мы получили укороченный код (7.3) с тем же числом проверочных символов.

В таблице (5.12) приведены кодовые сообщения и соответствующие им кодовые слова.

Таблица 5.12.

$\mathbf{m}_0 = (0 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{U}_0 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$
$\mathbf{m}_1 = (1 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{U}_1 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1)$
$\mathbf{m}_2 = (0 \ 1 \ 0)$	$\mathbf{U}_2 = (0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1)$
$\mathbf{m}_3 = (1 \ 1 \ 0)$	$\mathbf{U}_3 = (1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0)$
$\mathbf{m}_4 = (0 \ 0 \ 1)$	$\mathbf{U}_4 = (0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1)$
$\mathbf{m}_5 = (1 \ 0 \ 1)$	$\mathbf{U}_5 = (1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0)$
$\mathbf{m}_6 = (0 \ 1 \ 1)$	$\mathbf{U}_6 = (0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0)$
$\mathbf{m}_7 = (1 \ 1 \ 1)$	$\mathbf{U}_7 = (1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)$

Модель одиночных и двукратных канальных ошибок укороченного кода Хэмминга(7,3) из примера 5.3 и синдром вектора ошибок приведены в таблице 5.13.

Таблица 5.13.

$\mathbf{еош}_0 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_0 = (0 \ 0 \ 0 \ 0)$
$\mathbf{еош}_1 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_1 = (0 \ 1 \ 1 \ 1)$
$\mathbf{еош}_2 = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_2 = (1 \ 1 \ 0 \ 1)$
$\mathbf{еош}_3 = (0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_3 = (1 \ 0 \ 1 \ 1)$
$\mathbf{еош}_4 = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_4 = (1 \ 0 \ 0 \ 0)$
$\mathbf{еош}_5 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_5 = (0 \ 1 \ 0 \ 0)$
$\mathbf{еош}_6 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0)$	$\mathbf{S}_6 = (0 \ 0 \ 1 \ 0)$
$\mathbf{еош}_7 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)$	$\mathbf{S}_7 = (0 \ 0 \ 0 \ 1)$
$\mathbf{еош}_8 = (1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_8 = (1 \ 0 \ 1 \ 0)$
$\mathbf{еош}_9 = (0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_9 = (0 \ 1 \ 1 \ 0)$
$\mathbf{еош}_{10} = (0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_{10} = (0 \ 0 \ 1 \ 1)$
$\mathbf{еош}_{11} = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_{11} = (1 \ 1 \ 0 \ 0)$
$\mathbf{еош}_{12} = (0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0)$	$\mathbf{S}_{12} = (1 \ 0 \ 0 \ 1)$
$\mathbf{еош}_{13} = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0)$	$\mathbf{S}_{13} = (1 \ 1 \ 1 \ 1)$
$\mathbf{еош}_{14} = (0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_{14} = (0 \ 1 \ 0 \ 1)$
$\mathbf{еош}_{15} = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	$\mathbf{S}_{15} = (0 \ 1 \ 1 \ 1)$

Таким образом, комбинируя процедурами расширения и укорочения можно синтезировать помехоустойчивые коды с требуемыми характеристиками.

Примером практического применения кода Хэмминга (32,26) служит СРНС GPS NAVSTAR (США), в которой он используется при передаче цифровой информации с борта ИСЗ.

6 ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Одним из принципиальных моментов разработки навигационного приёмника является выбор частотного плана. Под частотным планом подразумевается выбор задающего генератора, частот гетеродинирования и дискретизации для того, чтобы минимизировать уровень паразитных гармоник, возникающих в схеме из-за различных нелинейностей, шумов и влияния цифровой части приёмника.

Для этого предварительно выбирают генератор, промежуточные частоты для гетеродинирования, фильтры и рассчитывают коэффициенты усиления всех каскадов. Далее анализируют получившуюся архитектуру и выявляют все нелинейные элементы, в результате работы которых могут возникать гармоники, попадающие в спектр сигнала. Варьируя промежуточные частоты, частоту дискретизации, характеристики смесителей, усилителей и фильтров, подбирают такую конфигурацию, которая обеспечивает оптимальный приём сигнала, то есть в спектре сигнала появляются дальние гармоники от нелинейных преобразований, которые малы и не оказывают серьёзного влияния на сигнал.

6.1 Структура навигационного приемника GPS

Для приёмников системы GPS с кодовым разделением каналов схема, представленная на рис. 6.1 отображает структуру приёмника в целом, то есть радиочастотная часть является общей и разделение по спутникам производится уже в цифровом блоке коррелятора.

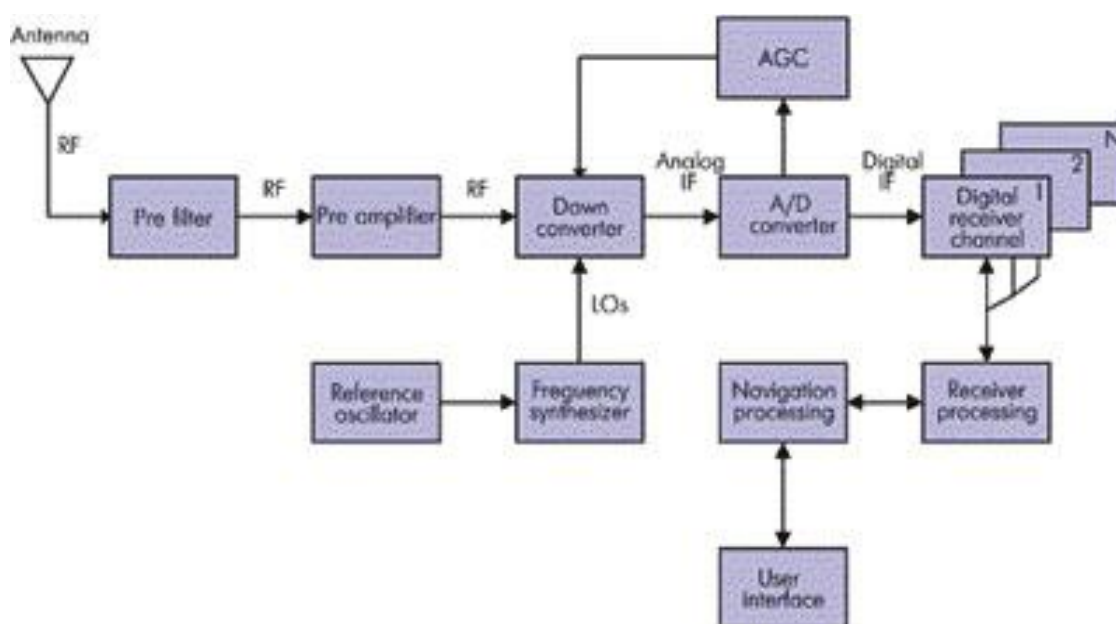


Рис. 6.1. Структура приёмника системы GPS

В антенне приемника может быть установлен предварительный усилитель, который обеспечивает коэффициент усиления $K_u \approx 30 - 40$ дБ и коэффициент шума $K_{ш} \approx 2.5$.

Радиочастотный блок предназначен для усиления принятых сигналов, частотной селекции (фильтрации) полезных сигналов из смеси с шумами и помехами, а также понижение несущей частоты принятых сигналов до заданного значения промежуточной частоты. Обычно под радиочастотной частью понимают совокупность входных усилителей и фильтров (Pre filter, Pre amplifier), систему 2-х или 3-х кратного гетеродинирования (Down converter) и АЦП (A/D converter) с автоматической регулировкой усиления (Automatic Gain Control - AGC).

В цифровом виде сигнал поступает в корреляционный приемник. Так как для решения навигационной задачи необходимо измерить псевдодальность и псевдоскорость относительно 4-х спутников, то навигационные приёмники строятся в многоканальном исполнении.

В корреляторе в цифровой форме формируются отсчёты синфазных и квадратурных компонент сигнала, которые являются основой для работы алгоритмов поиска сигнала по частоте и задержке, слежения за фазой сигнала и выделения навигационного сообщения.

Комплексные отсчёты поступают в сигнальный процессор, который, обрабатывая их, формирует значения псевдодальности и псевдофазы, решает навигационную задачу, формирует управляющий сигнал для ФАП каждого канала для замыкания петли слежения и управляет периферией. Помимо этого, коррелятор может формировать измерительную информацию, которая затем будет использована для вычисления псевдодальности и псевдофазы.

Для GPS-приёмников выпускается большая номенклатура различного рода радиочастотных блоков. В качестве примера приведем микросхем радиочастотных трактов, предлагаемых фирмами Tchip (TJ1004) и Texas Instrument (TRF5001).

6.2 Построения радиочастотных частей совмещённого приёмника

Существует несколько вариантов построения радиочастотных частей совмещённого навигационного приёмника системы GPS и ГЛОНАСС.

Первоначально схема приёмника была построена таким образом, что весь спектр GPS попадает в один радиочастотный тракт, а широкий спектр ГЛОНАСС разбивается на три диапазона, каждому из которых соответствует свой радиочастотный тракт. В каждом радиочастотном тракте используют свои частоты гетеродинирования для каждой полосы, таким образом, чтобы в спектрах сигнала, прошедших через выходной фильтр, присутствовали все литеры частот общего спектра сигнала системы ГЛОНАСС.

В результате все спутники системы GPS имеют одинаковые фазовые искажения. Сигналы от спутников ГЛОНАСС, попадающие в разные диапазоны спектра, имеют разные фазовые искажения, так как проходят через

разные радиочастотные части. Поэтому для использования фазовых измерений по ГЛОНАСС в приёмнике необходимо оценить искажения, вносимые каждым каналом. Однако величина искажений зависит от многих факторов, таких как температура, влажность и так далее. Полностью учесть величину искажений невозможно. Поэтому была предложена другая идеология построения радиочастотной части совмещённого приёмника ГЛОНАСС/GPS.

Схема радиочастотной части совмещённого приёмника ГЛОНАСС/GPS, выпускаемого фирмой Zarlink, представлена на рис. 6.2.

В данной схеме входной сигнал, состоящий из сигналов GPS и ГЛОНАСС, поступает на вход совмещённой антенны. После этого сигналы фильтруются полосовым фильтром и усиливаются антенным усилителем. Далее сигнал поступает в радиочастотную часть приёмника, где он фильтруется, усиливается и гетеродинируется первым гетеродином. В результате первого гетеродинирования получаем сумму сигналов GPS и GLONASS, лежащих в диапазоне 39 МГц (GPS) и (71-85) МГц (ГЛОНАСС). Затем с помощью полосового фильтра GPS и ГЛОНАСС сумма сигналов разделяется на два тракта. В первом тракте выделяем GPS-сигнал с помощью полосового фильтра. Сигнал во втором тракте мы пропускаем через фильтр верхних частот, чтобы отрезать все гармоники выше 90 МГц (зеркальная помеха). Далее сигнал во втором тракте подвергается гетеродинированию с частотой, равной 121.44 МГц. Спектр входного сигнала (39-85) МГц переносится в диапазон 82,44 МГц (GPS) и (50.44-336.44) МГц (ГЛОНАСС), то есть спектр сигнала "переворачивается" и сигнал выделяют с помощью полосового фильтра.

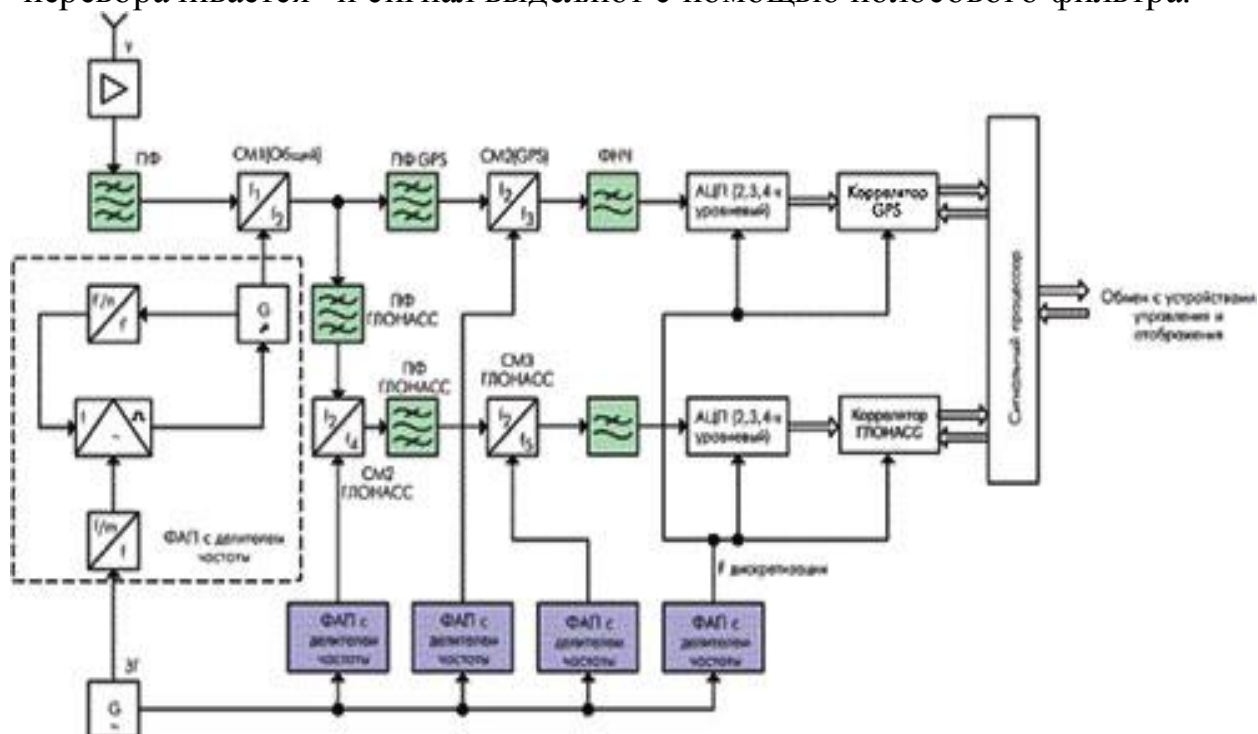


Рис. 6.2. Схема радиочастотной части совмещённого приёмника ГЛОНАСС/GPS

Далее сигнал в обоих трактах GPS и ГЛОНАСС гетеродинируют второй раз частотой 35.98 МГц. В первом тракте получаем GPS-сигнал на частоте 4 МГц, во втором тракте получаем совокупность всех сигналов ГЛОНАСС, спектр которой составляет (16.46-1.46) МГц. После чего каждый сигнал в обоих трактах дискретизируется частотой 35.98 МГц, квантуется с помощью двухуровневого квантователя и отсылается в коррелятор.

Отметим, что все сигналы ГЛОНАСС проходят по одному тракту. Поэтому фазовые задержки всех каналов идентичны. Предложенная схема позволяет проводить фазовые измерения, пригодные для последующей обработки.

Значительной проблемой при проектировании приёмников системы ГЛОНАСС/GPS является учёт влияния цифровой части приёмника на радиочастотную. Для уменьшения этого влияния обеспечиваются сильная развязка и экранирование радиочастотной части. Кроме этого, частоту дискретизации в АЦП выбирают кратной частоте задающего генератора и всем промежуточным частотам.

Если основным видом помех является белый гауссовский шум, то возможно применение малоуровневого квантования, вплоть до бинарного. Если помеха узкополосная стационарная, то необходимо большее число уровней квантования. Потери при применении бинарного квантования в условиях аддитивного белого гауссовского шума не превышают 1 дБ при частоте дискретизации порядка 30...40 МГц. Дальнейшего снижения потерь можно добиться, применяя 3-х или 4-х уровневое квантование. Однако, принимая во внимание то, что увеличение числа уровней квантования приводит к почти такому же увеличению аппаратных затрат на реализацию коррелятора, применение многоуровневого квантования в условиях, когда на вход приёмника поступает смесь сигнала и белого гауссовского шума, нецелесообразно. Совершенно иная картина наблюдается при наличии узкополосных стационарных помех.

6.3 Алгоритмы первичной обработки сигналов

Целью обработки сигналов и извлечения информации аппаратурой потребителя является выбор оптимального рабочего созвездия спутников и решение навигационной задачи. В общем случае, результатом решения навигационной задачи является определение вектора потребителя, состоящего из мгновенных координат и векторов их изменения по времени. Пространственное ускорение и линейная скорость объекта могут быть очевидным образом вычислены путем сравнения мгновенных координат объекта в моменты двух или большего числа измерений.

Существующие алгоритмы оптимального оценивания координат чрезмерно сложны для прямой обработки сигнала, поэтому процесс получения оценки вектора потребителя разбивают на два этапа: первичный и вторичный. На этапе первичной обработки решается задача фильтрации радионавигационных параметров сигнала, а на этапе вторичной обработки

вычисляются оценки вектора потребителя с использованием полученных на первом этапе оценок радионавигационных параметров.

Задача поиска сигнала от j -го спутника определяется, как задача оценки его параметров задержки и доплеровской частоты, которые принимаются постоянными на интервале наблюдения и выбираются из конечной области значений. При оценке параметров сигнала амплитуду и фазу можно считать случайными неинформационными параметрами.

В режиме фильтрации применяется совместная фильтрация информационных параметров и фазы сигнала (неинформационный параметр). Такой режим называют *квазикогерентной обработкой* сигнала.

6.4 Определение координат потребителя

Для определения координат потребителя необходимо знать координаты спутников (не менее 4) и дальность от потребителя до каждого видимого спутника. Для того, чтобы потребитель мог определить координаты спутников, излучаемые ими навигационные сигналы моделируются сообщениями о параметрах их движения. В аппаратуре потребителя происходит выделение этих сообщений и определение координат спутников на нужный момент времени.

Координаты и составляющие вектора скорости меняются очень быстро, поэтому сообщения о параметрах движения спутников содержат сведения не об их координатах и составляющих вектора скорости, а информацию о параметрах некоторой модели, аппроксимирующей траекторию движения КА на достаточно большом интервале времени (около 30 минут). Параметры аппроксимирующей модели меняются достаточно медленно, и их можно считать постоянными на интервале аппроксимации.

Параметры аппроксимирующей модели входят в состав навигационных сообщений спутников. В системе GPS используется Кеплеровская модель движения. В этом случае траектория полёта КА разбивается на участки аппроксимации длительностью в один час. В центре каждого участка задаётся узловый момент времени, значение которого сообщается потребителю навигационной информации. Помимо этого, потребителю сообщают параметры модели движения на узловом моменте времени, а также параметры функций, аппроксимирующих изменения параметров модели движения во времени как предшествующем узловому элементу, так и следующем за ним.

В аппаратуре потребителя выделяется интервал времени между моментом времени, на который нужно определить положение спутника, и узловым моментом. Затем с помощью аппроксимирующих функций и их параметров, выделенных из навигационного сообщения, вычисляются значения параметров модели движения на нужный момент времени. На последнем этапе с помощью обычных формул кеплеровской модели определяют координаты и составляющие вектора скорости спутника.

6.5 Факторы, влияющие на точность определения вектора потребителя

В реальных условиях на точность определения вектора потребителя влияет множество факторов. Рассмотрим эти факторы применительно к псевдодальномерному методу. Будем полагать, что применяется минимально возможное число измерений, равное количеству неизвестных координат потребителя.

Источники возникновения дальномерной погрешности можно разделить на три группы по их происхождению:

- вносимые контрольно-измерительным комплексом;
- вносимые оборудованием навигационного спутника;
- возникающие на трассе распространения сигнала;
- вносимые приемоиндикатором потребителя.

Первые две группы погрешностей связаны между собой и обусловлены, в основном, неидеальностью частотно-временного и эфемероидного обеспечения НКА. Погрешности частотно-временного обеспечения возникают при сверке и хранении бортовой шкалы времени НКА. Эти погрешности непосредственно и весьма значительно влияют на определение расстояния до спутника. Например, сдвиг излучаемых дальномерных кодов и меток времени на 1 мс соответствует погрешности измерения дальности в 300 км. Стабильность бортовой шкалы времени зависит от стабильности бортового эталона частоты ("атомные часы"). СКО сдвига бортовой шкалы через сутки после коррекции составляет 25,4 нс для цезиевых и 108 нс для рубидиевых эталонов частоты. Требования к СНС таковы, что СКО сдвига бортовой шкалы должно быть не более 10 нс.

Кроме аппаратных методов повышения стабильности шкалы, применяются алгоритмические методы, основанные на известных математических моделях поведения бортовых эталонов, и позволяющие прогнозировать отклонение. Непрогнозируемые отклонения бортовой шкалы времени относительно системной могут достигать 1 нс на интервале в 1 ч. В настоящее время средствами контрольно-измерительного комплекса ведется постоянное наблюдение за бортовыми эталонами каждого НКА, и для каждого из них рассчитывается индивидуальный алгоритм коррекции. В качестве модели, как правило, используется полином второй степени.

К дальномерным погрешностям частотно-временной области можно отнести и погрешности, вносимые групповой задержкой навигационного сигнала в аппаратуре спутника. Групповая задержка представляет собой интервал времени между выходным навигационным сигналом в фазовом центре передающей антенны и выходным сигналом бортового эталона частоты и времени. Систематическая составляющая групповой задержки измеряется при сборке и калибровке аппаратуры спутника, она индивидуальна для каждого НКА и передается в составе служебного сообщения НКА. Случайная составляющая рассматривается в составе дальномерной погрешности и обычно не превышает 3 нс.

Степень достоверности частотно-временных поправок зависит от их "возраста", т.е. от срока, прошедшего с момента их загрузки в память бортового вычислителя. В ситуации, когда происходит затмение спутника или коррекция его орбиты, возможно длительное отсутствие коррекции. Для уменьшения зависимости от интервала между обновлениями данных применяется режим межспутниковых измерений, реализованный на модернизированных спутниках в системе GPS и подлежащий реализации в ГЛОНАСС на спутниках типа ГЛОНАСС-М.

6.6 Краткий обзор аппаратуры потребителей

Аппаратура потребителей глобальных навигационных спутниковых систем предназначена для измерений текущих навигационных параметров и определения на их основе координат и скорости движения потребителя.

В качестве примера на рис. 6.5 приведен вид приемовычислительного модуля 1К-181-53, разработанного в Российском институте радионавигации и времени (РИРВ).

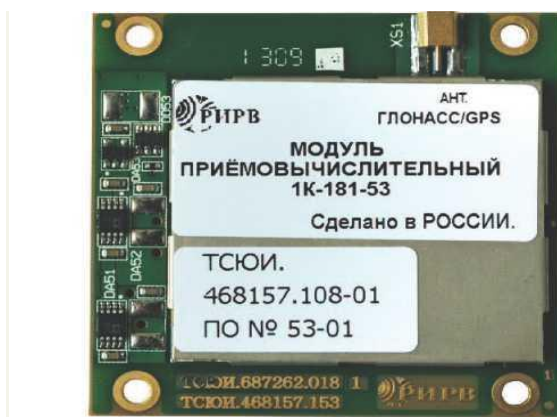


Рис.6.5. Вид приемовычислительного модуля 1К-181-56.

Модуль предназначен для построения широкого класса навигационной и синхронизирующей аппаратуры гражданских потребителей, работающей по сигналам кода стандартной точности ГНСС ГЛОНАСС и GPS.

Принцип действия навигационного приемника основан на параллельном приеме и обработке сигналов навигационных КА ГЛОНАСС в частотном диапазоне L1 (СТ-код) и GPS на частоте L1 (C/A код). Приемник имеет два для канала поиска (захвата) и 32 канала для сопровождения спутниковых сигналов, что позволяет осуществлять одновременный поиск спутниковых сигналов группировок ГЛОНАСС и GPS. Приемник позволяет применять для первичного поиска спутниковых сигналов специально подготовленную информацию, хранящуюся в памяти приемника, что позволяет сократить время холодного старта, а также, что существенно важнее, произвести холодный старт в условиях слабых сигналов от спутников. Специальная информация может быть подготовлена как внешними источниками (и передана на приемник по каналам

связи), так и самостоятельно приемником. В последнем случае не требуется получение какой-либо дополнительной информации от внешних источников. Приемник имеет встроенные средства подавления помех, что позволяет ему работать в условиях сложной помеховой обстановки. Управление работой приемника осуществляется при помощи специальных команд.

Дадим характеристику аппаратуры потребителей, разработанной в Российском институте радионавигации и времени

Аппаратура геодезической контрольно-корректирующей станции «ГККС».

Аппаратура предназначена для формирования корректирующей информации к измерениям приемников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS и передачи её потребителям с использованием технических средств связи.

Внешний вид комплекса аппаратуры представлен на рис. 6.6.



Рис. 6.6. Вид геодезической контрольно-корректирующей станции «ГККС».

Аппаратура геодезической контрольно-корректирующей «ГККС» обеспечивает максимальную эффективность статических и динамических съемок и может применяться при проведении геодезических работ для высокоточного определения координат точек земной поверхности совместно с аппаратурой:

- «Изыскание» - в режимах реального времени и постобработки
- «Геодезия» только в режиме постобработки.

Спутниковая геодезическая аппаратура «Изыскание».

Спутниковая геодезическая аппаратура «Изыскание» работает по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS и предназначена для обеспечения топогеодезических работ, геологоразведки, специального строительства и мониторинга земной поверхности.

Аппаратура обеспечивает определение координат точек земной поверхности:

- в режиме реального времени с использованием корректирующей информации, переданной от ГККС по радиоканалу стандарта GSM или УКВ;
- в режиме постобработки измерений с использованием информации, полученной с ГККС или других геодезических приемников.

Внешний вид аппаратуры «Изыскание» представлен на рис. 6.7.



Рис. 6.7. Внешний вид комплекса аппаратуры «Изыскание»

Навигационная аппаратура потребителей «Интеграция».

Навигационная аппаратура потребителей «Интеграция» работает по сигналам спутниковых систем ГЛОНАСС, GPS и наземных импульсно-фазовых радионавигационных систем (ИФРНС) «LORAN-C» и «Чайка».

Внешний вид навигационной аппаратуры «Интеграция» представлен на рис. 6.6.



Рис.6.6. Вид навигационной аппаратуры «Интеграция».

Аппаратура обеспечивает навигацию морских судов при плавании в открытом море и прибрежной зоне, прохождении узостей, заходе в порты и

маневрировании в портах; судов речного флота при движении по озерам, водохранилищам, рекам и каналам, а также высокоточное определение местоположения и скорости наземного транспорта. НАП «Интеграция» предназначена для работы на морских и речных транспортных средствах, скорость которых не превышает 70 узлов.

Судовая приемная аппаратура АКВА БОРТ-12.

Судовая приемная аппаратура АКВА БОРТ-12 работает по сигналам спутниковых систем ГЛОНАСС, GPS и сигналов средневолновых морских радиомаяков, передающих корректирующую информацию.

Аппаратура предназначена для обеспечения трехмерного определения координат, времени, скорости движения судна и путевого угла, а также для решения задач маршрутной навигации морских судов любой тоннажности.

Внешний вид судовой приемной аппаратуры АКВА БОРТ-12 представлен на рис. 6.9.



Рис.6.9. Вид судовой приемной аппаратуры АКВА БОРТ-12.

Навигационная аппаратура АКВА БОРТ-12 обеспечивает определение:

- геодезических координат судна;
 - вектора путевой скорости (путевой угол, путевая скорость);
 - времени в шкалах UTC (SU) и UTC (US);
 - ввод и хранение до 1000 маршрутных точек;
 - ввод и хранение в памяти до 20 маршрутов или фарватеров (до 50 точек в каждом маршруте).
- расчет времени прихода судна в точку с заданными координатами с заданной скоростью движения;
- расстояния и направления между двумя маршрутными точками;
 - параметров отклонения от заданного маршрута.

Автомобильная приемная аппаратура КОТЛИН ИТ-101.

Автомобильная приемная аппаратура КОТЛИН ИТ-101 работает по сигналам спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС, GPS и предназначена для высокоточного определения текущих координат, скорости движения транспортного средства и времени. На рис. 6.10 изображен модуль приемной аппаратуры КОТЛИН ИТ-101.



Рис. 6.10. Автомобильный модуль приемной аппаратуры КОТЛИН ИТ-101.

В состав приемного модуля входят 16 универсальных каналов приема сигналов стандартной точности с произвольным распределением между системами ГЛОНАСС и GPS позволяют при решении навигационной задачи выбирать оптимальное созвездие спутников. Одновременное использование сигналов систем ГЛОНАСС/GPS позволяет повысить достоверность и непрерывность навигационных определений.

Персональный навигатор НАП ИТ-1816.

Персональный навигатор НАП ИТ-1813 может использоваться при пеших перемещениях и при передвижениях на транспортных средствах.

Персональный навигатор НАП ИТ-1813 обеспечивает:

- прием сигналов и комплексную обработку информации ГНСС ГЛОНАСС/GPS и SBAS;
- определение местоположения пользователя;
- вычисление параметров движения, решение сервисных задач, а также определение времени и даты;
- запись и отображение пройденного маршрута;

- воспроизведение аудио/видео файлов

Отображение навигационной информации производится на цветной электронной карте, индицируемой на дисплее.

Внешний вид аппаратуры изображен на рис. 6.11.



Рис. 6.11. Внешний вид персонального навигатора НАП НТ-1816.

Определение местоположения подвижного потребителя производится навигатором в пределах всего земного шара в любое время года и суток на стоянке или в движении при прямой радиовидимости не менее четырех НКА и при соответствии характеристик сигналов интерфейсным контрольным документам ГНСС ГЛОНАСС и GPS.

В завершении следует отметить, что не менее востребована аппаратура потребителей СРНС и многих других Российских разработчиков и производителей.

7 НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

7.1 Общая характеристика навигационных систем GPS и ГЛОНАСС

В завершении отразим общие характеристика и отличия навигационных систем GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. Основные характеристики навигационных систем GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС отражены в табл. 7.1.

Табл. 7.1

Показатель	ГЛОНАСС	GPS NAVSTAR
Число НКА в полной системе	24	24
Число орбитальных плоскостей	3	6
Число НКА в каждой плоскости	8	4
Наклонение орбиты, °	64,8	55
Высота орбиты, км	19 130	20 180
Период обращения НКА	11 ч 15 мин 44 с	11 ч 58 мин 00 с
Система координат	ПЗ-90	WGS-84
Масса НКА, кг	1450	1055
Несущая частота:		
L1	1598,0625—1604,25	1575,42
L2	7/9 L1	60/77 L1
Поляризация излучения	Правосторонняя	Правосторонняя
Тип ПСП	М-последовательность	Код Голда
Число элементов кода		
C/A	511	1023
P	51 1000	2,35x1014
Скорость кодирования, Мбит/с		
C/A	0,511	1,023
P	5,11	10,23
Структура навигационного сообщения		
Скорость передачи, бит/с	50	50
Вид модуляции	BPSK (Манчестер)	BPSK NRZ
Длина суперкадра, мин	2,5 (5 кадров)	12,5 (25 кадров)
Длина кадра, с	30 (15 строк)	30 (5 строк)
Длина строки, с	2	6

К основным отличиям, прежде всего, следует отнести различия в навигационных сигналах. Во-первых, в GPS применяется кодовое разделение каналов, а в ГЛОНАСС - частотное. Во-вторых, в отличие от GPS, в ГЛОНАСС никогда не применялось преднамеренное ухудшение характеристик сигнала стандартной точности.

Орбитальная группировка СНС ГЛОНАСС построена таким образом, что меньше, чем у GPS, подвержена влиянию нецентричности поля тяготения Земли и коррекция положения СНС требуется намного реже.

Системное время и навигационные сообщения в системе GPS имеют специфическую структуру данных, которая существенно отличается от структуры ГЛОНАСС. Благодаря тому, что длительность суперкадра в СНС ГЛОНАСС составляет 2,5 мин (в отличие от 12,5 мин для GPS), в ней происходит более быстрое обновление альманаха.

Различия в алгоритмах формирования навигационных сигналов и применяемых системах времени и координат менее важны с точки зрения конечного потребителя при построении комбинированной аппаратуры или выборе СНС. Эти различия преодолеваются соответствующими алгоритмическими и вычислительными методами, используемыми в приемнике потребителя.

Общее направление развития спутниковых систем связано с повышением точности навигационных определений, улучшением сервиса, предоставляемого пользователям, повышением срока службы и надёжностью бортовой аппаратуры спутников, улучшением совместимости с другими радиотехническими системами и развитием дифференциальных подсистем.

Совершенствование системы ГЛОНАСС планируется осуществлять на базе спутников нового поколения "ГЛОНАСС-М". Этот спутник будет обладать увеличенным ресурсом службы и станет излучать навигационный сигнал в диапазоне L2 для гражданских применений.

7.2 Дифференциальная подсистема СРНС

Спутниковые навигационные системы позволяют определить координаты потребителя с точностью порядка 7...15 метров. Но в ряде случаев требуется более высокая точность определения. К таким случаям относятся геодезические измерения и картография, строительные работы, точная проводка судов в береговой зоне, навигация в городских условиях и т.д. Добиться существенного увеличения точности определения координат (до единиц и долей сантиметра) удастся при помощи функционального дополнения к СРНС, называемого *дифференциальной подсистемой*.

Основу дифференциальной подсистемы составляет наземная контрольно-корректирующая станция (ККС), координаты которой известны и определены с большой точностью. Как правило, в подобных случаях говорят о координатах фазового центра приемной антенны. Путем сравнения измеренных значений псевдодальностей до спутников с достоверными значениями, вычисленными на

основе полученной от главной станции информации об орбитах НКА, вычисляются поправки к псевдодальностям. Полученные значения поправок передаются потребителям по специально выделенным линиям передачи данных. Потребитель должен иметь соответствующий приемник, оснащенный модулем для приема радиосигналов ККС. Как правило, расстояние между потребителем и наземной ККС пренебрежимо мало по сравнению с расстоянием до НКА. Поэтому с большой долей приближения можно считать, что на расстояниях до 200 - 300 км потребитель и ККС находятся в идентичном по всем параметрам навигационном поле. Следовательно, поправки, вычисленные для ККС, справедливы и для потребителя. Так, при расстоянии между ККС и потребителем, составляющем 100 км, погрешность определения координат потребителя, вызванная непостоянством ошибок псевдодальности в пространстве составляет единицы сантиметров, а при расстоянии до ККС порядка 1000 км - десятки сантиметров. На практике стараются располагать ККС не далее 500 км от целевых потребителей.

Принято различать широкозонные, региональные и локальные дифференциальные подсистемы, хотя такое деление зачастую является условным.

Широкозонные дифференциальные подсистемы. Основой широкозонной подсистемы является сеть специальных широкозонных ККС, информация о поправках с которых передается на главную станцию. После дополнительной проверки на главной станции вырабатывается комплекс общих поправок и сигналов целостности. Выработанные сигналы передаются, как правило, на геостационарные спутники, с которых транслируются на приемники потребителей. Применение геостационарных спутников позволяет обеспечить радиус рабочей зоны порядка 5000...6000 км. Достаточно часто ККС, входящие в состав широкозонной подсистемы, обеспечивают и локальный сервис с применением дополнительных каналов передачи данных.

Региональные дифференциальные подсистемы имеют диаметр зоны обслуживания от 400 до 2000 км и предназначены для навигационного обеспечения отдельных регионов континента или моря/океана. В состав РДПС входят одна или несколько ККС, а также аппаратура контроля целостности и средства передачи данных потребителю. Эти данные вырабатываются либо на главной станции, либо непосредственно на ККС.

Локальные дифференциальные подсистемы функционируют при дальностях до потребителя в диапазоне 50...200 км и обычно имеют в своем составе одну ККС, аппаратуру управления и контроля целостности и средства передачи данных. В качестве аппаратуры передачи данных ЛДПС часто применяют имеющиеся радиомаяки, уплотняя их сигнал и включая в него данные от ЛДПС. Такое решение обосновано экономически, но сигнал радиомаяков, часто работающих в средневолновом диапазоне, весьма подвержен помехам и не позволяет передавать данные с большой скоростью.

Локальные дифференциальные подсистемы обычно разделяют по способу их применения на морские, авиационные и геодезические. Морские ЛДПС

предназначены для обеспечения мореплавания в проливах, каналах, акваториях портов и гаваней. Авиационные ЛДПС обеспечивают точный заход на посадку и посадку воздушного судна в соответствии с требованиями ИКАО к посадке по категориям. Геодезические ЛДПС используются при проведении исследований движения земной коры, землемерных, крупных строительных и иных специальных работ.

Псевдоспутники (псевдолиты). Возможна разновидность дифференциальной подсистемы, когда передаваемые потребителю сигналы с поправками и другой информацией привязаны к местной шкале времени. После учета поправок шкала времени потребителя также оказывается привязанной к местной шкале времени, следовательно, принятые потребителем сигналы дифференциальной подсистемы являются источником информации о взаимной дальности и скорости потребителя относительно дифференциальной станции. Если дифференциальная станция излучает сигнал, аналогичный сигналу НКА, она называется псевдоспутником (псевдолитом). Наиболее очевидным и частым примером применения псевдоспутников является выведение самолетов на посадочную глиссаду. При неудачном расположении НКА наличие псевдоспутников позволяет снизить значение геометрического фактора в вертикальной плоскости в 35...8 раз и в горизонтальной плоскости в 5...4 раза.

7.3 Развитие мировой спутниковой системы

Современные приложения радионавигации космического базирования чрезвычайно многообразны. В настоящее время гражданскому потребителю доступны две равноценные и взаимодополняющие глобальные навигационные спутниковые системы: GPS и ГЛОНАСС. На стадии тестирования находятся СРНС Galileo, продвигаемая Европейским Сообществом, и китайская СРНС BeiDou. Кроме того, Япония начала практическое развертывание региональной навигационной спутниковой системы (РНСС) QZSS (*Quasi-Zenith Satellite System*), которую можно считать функциональным дополнением GPS. Одновременно Индия планирует развертывание собственной РНСС IRNSS двойного применения

Краткие обзор этих систем на основании интерфейсных документов (Galileo, COMPASS, QZSS) и концепции развития (IRNSS) приводится в следующих разделах.

7.5.1 Европейский проект СРНС

Galileo - европейский проект СРНС, разработку которой осуществляет Европейское Космическое Агентство (ЕКА) совместно с ЕС. Разработка собственной СРНС осуществлялась ЕС с опорой на достижения GPS и возможность совместного использования указанных спутниковых систем для задач высокоточного местоопределения.

Помимо стран ЕС в проекте участвуют Китай, Израиль, Южная Корея, Украина и Российская Федерация, кроме того на стадии переговоров находится участие в проекте Аргентины, Австралии, Бразилии, Чили, Индии и Малайзии. Ожидается, что система Galileo войдёт в строй в 2016 г., когда на орбиту будут выведены все 30 запланированных спутников (27 операционных и 3 резервных). Космический сегмент будет обслуживаться наземной инфраструктурой, включающей в себя три центра управления и глобальную сеть передающих и принимающих станций. В отличие от большинства СРНС Galileo создавалась изначально как гражданская навигационная система, и не контролируется национальными военными учреждениями.

Орбитальная группировка в настоящее время насчитывает четыре спутника, расположенных на высоте 23 222 км, проходящих один виток за 14 ч 4 мин и 42 с. Три орбитальные плоскости наклонены под углом 56° к экватору, что после вывода на орбиту всех КА обеспечит одновременную видимость из любой точки земного шара, по крайней мере, четырёх КА. Развертывание космического сегмента системы Galileo планируется завершить к 2020 году.

СРНС Galileo использует сервисно-ориентированный подход к предоставлению навигационных услуг различным категориям потребителей. Так, помимо открытой службы (Open Service) предусматриваются сигналы для службы повышенной надежности (Safety-of-Life Service), коммерческой службы (Commercial Service), правительственной службы (Public Regulated Service) и поисково-спасательной службы (Search and Rescue).

7.5.2 Китайская спутниковая радионавигационная система

Глобальная китайская спутниковая радионавигационная система второго поколения BeiDou-2 (прежде называвшаяся Compass) призвана заменить экспериментальную региональную навигационную систему Beidou-1 на основе четырех геостационарных спутников.

Космический сегмент новой системы состоит из 35 КА, в состав которых входят 5 спутников на геостационарных орбитах, обеспечивающих совместимость с СРНС Beidou-1, 27 на средних орбитах и 3 на наклонных геосинхронных орбитах. Геостационарные КА расположены на высоте 35 786 км и меридианах $58,75^\circ\text{E}$, 80°E , $110,5^\circ\text{E}$, 140°E и 160°E , соответственно. Орбитальные КА функционируют на орбите, расположенной на высоте 21 528 км, наклоненной на 55° к плоскости экватора. Геосинхронные КА расположены на орбитальной плоскости, находящейся на высоте 35 768 км относительно Земной поверхности, наклоненной под углом в 55° к плоскости экватора. В настоящее время космический сегмент состоит из 5 геостационарных, 4 среднеорбитальных и 5 наклонных геосинхронных КА. Формирование космической группировки закончится к 2015 г. и обеспечит полное равномерное покрытие Земного шара.

Несущие частоты СРНС Beidou локализованы в диапазонах В1 (1561,098 МГц), В2 (1207,14 МГц) и В3 (1268,52 МГц). Указанные частотные диапазоны частично перекрываются с диапазонами других СРНС: ГЛОНАСС, GPS и Galileo; в настоящее время ведется урегулирование вопроса их совместного использования. В частности наиболее остро стоит проблема совместимости сигналов В2 BeiDou и сигналов Е2 правительственной службы Galileo.

В настоящее время вещание СРНС BeiDou осуществляется в тестовом режиме в диапазоне В1. Навигационный сигнал представляет сумму двух квадратурных составляющих I (открытый сигнал) и Q (закрытый сигнал с санкционированным доступом). Сигнал В1I модулирован квадратурной ФМ (QPSK), передается на частоте 1561,098 МГц с шириной полосы пропускания 4,092 МГц и имеет кодовый тип разделения. Минимальный уровень мощности принимаемого пользователем сигнала у Земной поверхности (с углом возвышения более 5°) составляет -163 дБВт. Требуемая глубина режекции внеполосных излучений составляет не менее 15 дБ вне рабочей области 1561,098±30 МГц. Дальномерный код имеет длину 2046 чипов, тактовую частоту 2,046 МГц. Скорость передачи навигационной информации составляет 50 бит/с.

7.5.3 Японская спутниковая система

QZSS (*Quasi-Zenith Satellite System* - «квазизенитная спутниковая система») - проект японской спутниковой системы, создаваемой как региональное дополнение GPS и имеющей собственные навигационные возможности. Основной задачей QZSS является предоставление услуг связи и позиционирования для мобильных устройств. В настоящее время система находится на стадии развертывания. Первый спутник «Michibiki» запущен 11 сентября 2010 г., запуск еще трех спутников планируется осуществить к концу 2017 г. Космическая группировка системы будет состоять из трех (и более спутников), расположенных на высокоэллиптических орбитах и разнесенных под углом в 120°. Покрытие, создаваемое созвездием КА, охватывает страны Южной Азии, Австралию и Океанию. Особенности орбитальной конфигурации позволяют космическим аппаратам находиться более 12 часов в сутки в пределах сектора в 20° относительно зенита. Этот факт объясняет название системы - «квазизенитная».

СРНС QZSS (первого поколения) излучает шесть сигналов в диапазоне L, пять из которых используют те же самые структуры, частоты и форматы сообщений, что и сигналы GPS. Региональная система передает дальномерные совместимые сигналы L1C/A, L1C, L2C и L5. Кроме того на территории Японии будет доступен сигнал L1SAIF, передающий дифференциальные поправки на частоте 1575,42 МГц. Еще один экспериментальный сигнал LEX, передаваемый на частоте 1278,75 МГц, совместим с сигналом E6-CS Galileo и имеет повышенную скорость передачи данных (2 кбит/с).

Сигнал L1 QZSS представляет собой две квадратурные составляющие, одна из которых, в отличие от сигнала L1 GPS (см. 1.3), передает открытый сигнал L1C/A, а другая – пилот-сигнал L1CP и сигнал с данными L1CD, разность фаз которых составляет 90° .

Экспериментальный сигнал LEX не имеет пилотной составляющей и модулирован по схеме BPSK(5). Сигнал модулируется отдельно двумя дальномерными кодами малой и большой длины, а затем уплотняется по времени. Минимальные уровни мощности принимаемого на уровне Земной поверхности сигнала для L1-SAF и LEX равны соответственно -161 дБВт и -155,7 дБВт.

Совместное использование QZSS и GPS позволит улучшить точность и надежность работы навигационных систем, эксплуатирующих GPS сигналы.

7.5.4 Индийская региональная СРНС

IRNSS (*Indian Regional Navigation Satellite System*) - индийская региональная СРНС, разрабатываемая индийской организацией космических исследований под контролем правительства, в настоящее время находится на стадии разработки. Система предполагает два вида доступа к навигационной информации - открытый (СТ) для гражданского пользования и санкционированный (ВТ) для военных нужд.

Спутниковая группировка IRNSS должна состоять из семи спутников: три на геостационарных орбитах, четыре на геосинхронных орбитах с наклоном в 29° по отношению к экваториальной плоскости. Также предусмотрены два резервных спутника. Космическая группировка будет иметь непрерывную видимость со всеми управляющими станциями Индийского региона. В настоящее время на орбиту выведен один КА (1 июля 2013). Излучение навигационных сигналов открытого и санкционированного доступа планируется осуществлять в двух частотных диапазонах S и L5. Сигнал СТ будет использовать модуляционный формат БФМ (BPSK(1)), в то время как для ВТ сигнала предлагается ВОС(5,2). Для улучшения характеристик последнего предусматривается «пилот-сигнал». Разделение сигналов - кодовое.

7.4 Модернизация навигационной системы ГЛОНАСС

7.4.1 Продвижение в новые частотные диапазоны

Как действующие СРНС, так и планируемые к осуществлению занимают различные участки спектра в диапазоне L. Существенное наращивание числа систем, занимающих одни и те же полосы, неизбежно ведет к коллизиям, как между ними, так и со сторонними системами, в частности системами радиоастрономических наблюдений и с аэронавигационными службами. В свете указанной проблемы представляется оправданной заинтересованность в перемещении новых сигналов спутниковой навигации в менее загруженные

частотные диапазоны. Регламентом ИТУ радионавигационным линиям «космос–Земля» помимо упомянутого диапазона L выделены узкие спектральные полосы в диапазонах S, C и Ku. С учетом конфликта функционирующей версии СРНС ГЛОНАСС с радиоастрономической службой в диапазоне L при проектировании новых радиointерфейсов требуется с особой тщательностью подойти к выбору модуляционных форматов навигационных систем с тем, чтобы уложиться в жесткие нормы по проникновению стороннего излучения в смежные диапазоны. Тем самым набор приоритетных требований к сигналу дополняется ограничениями на компактность спектра. Традиционные для СРНС навигационные сигналы с бинарной фазовой модуляцией обладают высоким уровнем внеполосного излучения и требуют введения режекции спектральных компонент в конфликтной частотной области, приводящей к паразитной амплитудной модуляции фильтрованного НС. Радикальное решение указанной проблемы состоит в переходе от стандартной фазовой модуляции к спектрально-эффективным форматам, в частности, к модуляции с непрерывной фазой. В данный момент идет разработка и уточнение радиointерфейса следующего поколения СРНС ГЛОНАСС.

Модернизация системы ГЛОНАСС будет производиться путем постепенной замены существующей орбитальной группировки КА на новое поколение спутников текущей модификации «ГЛОНАСС-М» и следующей модификации «ГЛОНАСС-К» с увеличенным сроком службы до 10 лет, уменьшенными массогабаритными характеристиками и повышенной стабильностью стандарта частоты. КА модернизированной системы ГЛОНАСС будут передавать навигационные сообщения в трех частотных диапазонах L1 (~1600 МГц), L2 (~1250 МГц) и L3 (~1200 МГц).

7.4.2 Введение сигналов с кодовым разделением (CDMA)

Согласно принятой концепции развития системы ГЛОНАСС планируется введение сигналов с кодовым разделением (CDMA) во всех указанных диапазонах с сохранением принципа преемственности. Так, планируется организовать три сигнала СТ и два сигнала ВТ в формате CDMA. Каждый из пользовательских сигналов будет иметь две компоненты: составляющую с навигационной информацией и без навигационной информации - пилот-сигнал. Сигнал (СТ) диапазона L3 передается на частоте 1 202,25 МГц и представляет собой квадратурную фазоманипулированную конструкцию (QPSK), одна из составляющих которой является пилотным сигналом, а другая - информационным. Далее сигнал манипулируется бинарным ПСП кодом длиной 10 230 чипов, следующих с периодом 1 мс. Модуляция каждой из составляющих - бинарная фазовая BPSK.

Сигналы L1 СТ и ВТ передаются на частоте 1600.995 МГц, а СТ и ВТ L2-на частоте 1247.06 МГц, перекрывая диапазон сигналов формата FDMA. Пилотная и информационная составляющие открытых сигналов L1 и L2

модулированы форматами BOC(1,1) и BPSK(1), соответственно, разнесены по времени и передаются в квадратуре с закрытыми сигналами. При таком типе модуляции пик мощности смещается на края частотного диапазона, и защищённый сигнал не мешает передающемуся на той же несущей частоте открытому узкополосному сигналу.

В следующем поколении радиоинтерфейса ГЛОНАСС возможны дальнейшие расширения номенклатуры сигналов КА с целью повышения унификации и взаимодополняемости СРНС ГЛОНАСС с системами GPS, Galileo и Compass. Так в унифицированных системах ГЛОНАСС:

- в диапазоне L1 предлагается излучать сигнал BOC(1,1) на частоте 1575,42 МГц, совпадающий с сигналом L1C модернизированной GPS и сигналом E1 систем Galileo и Compass;

- в диапазоне L5 – сигнал BPSK(10) на частоте 1176,45 МГц, совпадающий с сигналом Safety-of-Life (L5) модернизированной GPS и сигналом E5a системы Galileo;

- в диапазоне L3 - сигнал BPSK(10) на частоте 1207,14 МГц, который совпадает с сигналом E5b систем Galileo и Compass.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Материал настоящего пособия предназначен для изучения его на лекционных занятиях. Углубленное и более детальное изучение основных теоретических разделов выполняется студентами при самостоятельном изучении дисциплины. Выполнение практических заданий и компьютерного моделирования, позволяют студенту оценить степень усвоения теоретического материала. Естественно, что такая структура изучения материала неизбежно приводит к повторению ключевых понятий.

Все содержание пособия посвящено принципам построения СРНС; законам орбитального движения искусственных спутников Земли; шкалам времени, используемых в СРНС, и принципам синхронизации; методам решения навигационных задач; принципам построения приемников сигналов СРНС.

Разработчики и потребители спутниковых радионавигационных систем должны внимательно следить за результатами фундаментальных исследований. Это предъявляет высокие требования к образованию современного радиоинженера, в котором курс «Введение в спутниковые радионавигационные системы» играет особую роль, объединяя в единую систему знания, получаемые студентом в процессе обучения.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. – М.: «Эко-Трендз», 2000, 230с.
2. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. – М.: «Горячая линия-Телеком», 2005, 271с.
3. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС. Под. ред. В.Н. Харисова, А.И. Перова, В.А. Болдина. – М.: ИПРЖР, 1998, 210с.
4. , 2005, 41с.
5. Насыров И. А. Введение в современные спутниковые радионавигационные системы. Учебное пособие. – Казанский государственный университет, 20035. – 43 с.
6. Ипатов В. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения – М.: Техносфера, 2007 г.