

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

В. Н. Мищенко

СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

Рекомендовано УМО вузов Республики Беларусь по образованию в области информатики и радиоэлектроники в качестве учебно-методического пособия для студентов учреждений, обеспечивающих получение высшего образования по специальностям «Многоканальные системы телекоммуникаций» и «Системы радиосвязи, радиовещания и телевидения»

Минск БГУИР 2011

УДК 629.056.8(076.5)
ББК 32.884.1я73
М71

Р е ц е н з е н т ы:

заведующий кафедрой телекоммуникационных систем
Высшего государственного колледжа связи,
кандидат технических наук, доцент К. И. Пирогов;
кафедра связи учреждения образования
«Военная академия Республики Беларусь», начальник кафедры связи,
кандидат технических наук С. А. Манько

Мищенко, В. Н.

М71 Системы спутниковой навигации : учеб.-метод. пособие / В. Н. Мищенко. – Минск : БГУИР, 2011. – 56 с. : ил.
ISBN 978-985-488-500-1.

Рассматриваются системы спутниковой навигации ГЛОНАСС и GPS. Представлены общие сведения о спутниковых радионавигационных системах, описаны виды радиосигналов и аппаратура потребителей, а также дальнейшие направления развития систем спутниковой навигации.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальностям связи и радиотехники.

**УДК 629.056.8(076.5)
ББК 32.884.1я73**

ISBN 978-985-488-500-1

© Мищенко В. Н., 2011
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиотехники», 2011

ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АРУ – автоматическая регулировка уровня
АЦП – аналого-цифровой преобразователь
БАМИ – бортовая аппаратура межспутниковых измерений
БШВ – бортовая шкала времени
ВТ – высокая точность
ГУН – генератор, управляемый напряжением
ИП – информационная последовательность
ИСЗ – искусственный спутник Земли
КА – космический аппарат
КСВ – коэффициент стоячей волны
ЛДПС – локальная дифференциальная подсистема
МПЛ – микрополосковая линия
МШУ – малозумящий усилитель
НАП – навигационная аппаратура потребителей
НС – навигационный искусственный спутник Земли
НКА – навигационный космический аппарат
НКУ – наземный комплекс управления
ОГ – орбитальная группировка
ОЗУ – оперативное запоминающее устройство
ОГНЧ – опорный генератор несущей частоты
П – потребитель
ПВЗ – параметры вращения Земли
ПД – псевдодальность
ПЗУ – постоянное запоминающее устройство
ПС – псевдоскорость
ПСП – псевдослучайная последовательность
РЧБ – радиочастотный блок
РДПС – региональная дифференциальная подсистема

СВЧ – сверхвысокая частота
СКО – среднеквадратическая ошибка
ССФ – следящая система за фазой сигнала
СШВ – системная шкала времени
СРНС – спутниковая радионавигационная система
СТ – стандартная точность
ОФД – относительно-фазовый демодулятор
ОФМ – относительно-фазовая манипуляция
ФНЧ – фильтр низких частот
ФОК – формирователь относительного кода
ФЧАПЧ – фазочастотная автоматическая подстройка частоты
ФЧД – фазочастотный детектор
ЧВП – частотно-временная привязка
ЦВ – цифровой вычислитель
УЦГС – управляемый цифровой генератор гармонического сигнала
ШВ – шкала времени
ШДПС – широкозонная дифференциальная подсистема
ЭИ – эфемеридная информация
ЭИИМ – эквивалентная изотропная излучаемая мощность
ЭШТ – эквивалентная шумовая температура
ЭЧВИ – эфемеридная и частотно-временная информация
DSP (Digital Signal Processor) – цифровой сигнальный процессор

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ.....	8
1.1. Структура спутниковых радионавигационных систем и их основные характеристики	8
1.2. Этапы развертывания СРНС ГЛОНАСС.....	11
1.3. Этапы развертывания СРНС GPS	13
1.4. Системы используемых координат. Частотно-временное обеспечение и шкалы времени.....	16
2. ПОДСИСТЕМА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.....	20
2.1. Орбитальные характеристики спутников	20
2.2. Радиосигналы в СРНС.....	24
2.2.1. Виды используемых сигналов.....	24
2.2.2. Характеристики излучаемых навигационных радиосигналов	26
2.3. Характеристики модулирующих последовательностей.....	31
3. АППАРАТУРА ПОТРЕБИТЕЛЕЙ.....	36
3.1. Принципы построения аппаратуры потребителей.....	36
3.2. Антенна навигационного приемника.....	38
3.3. Радиоприемник	43
3.4. Аналого-цифровой преобразователь, опорный генератор, синтезатор частот и многоканальный коррелятор	46
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	49
ЛИТЕРАТУРА	54

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковая навигация – сравнительно новая, быстро развивающаяся ветвь навигации подвижных объектов. Она явилась одной из первых областей прикладной космонавтики, ориентированной на удовлетворение потребностей практической деятельности человека.

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) 1-го поколения, появившиеся в начале 60-х гг., быстро зарекомендовали себя как весьма точные и надежные средства морского судовождения. Их использование позволило оценить возможности применения СРНС также для воздушной навигации, для навигации наземных подвижных объектов, для определения параметров движения космических аппаратов (КА) и для систем управления движением. СРНС 1-го поколения (типа российской «Цикада» и американской «Транзит») обладали, однако, существенным недостатком – при движении потребителя (П) точность местоопределения уменьшалась из-за влияния погрешностей счисления. В самом деле такие системы строились на нескольких, шести, навигационных искусственных спутниках Земли (НС), обращающихся по независимым орбитам высотой 1000 км, узлы которых равномерно распределялись по экватору. При такой структуре системы, во-первых, НС проходят через зону видимости наземного потребителя независимо друг от друга, в среднем через 1,5 ч на экваторе, что допускает проведение только дискретных навигационных сеансов; во-вторых, ввиду использования в сеансе лишь одного НС продолжительность измерений может достигать до 10–16 мин. Таким образом, большая длительность сеансов и значительные интервалы между ними делают неизбежным использование счисления координат, при этом ошибки счисления ограничивают точность местоопределения.

СРНС 2-го поколения создавались как системы, которым такие недостатки несвойственны. При обосновании и разработке структуры СРНС основное внимание было уделено принципам построения таких систем, которые обеспечивали бы для любых потребителей (как движущихся, так и неподвижных относительно поверхности Земли) повышенную точность местоопределения, непрерывность навигационной работы и практически мгновенную выдачу опре-

деляемых параметров. Основное внимание сосредоточилось на средневысоких орбитах. Спутники на таких орбитах имеют достаточно обширную зону видимости и позволяют уверенно выполнять по ним радиально-скоростные измерения. На среднеорбитных спутниках оказывалось возможным реализовать важную для нового поколения СРНС техническую идею – координацию пространственного расположения НС на орбитах и координацию по времени излучаемых спутниками сигналов. Именно координация движения всех НС придает системе сетевые свойства, которых она лишается при отсутствии коррекции положения НС.

В России СРНС 2-го поколения получила наименование ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система). В США в качестве системы 2-го поколения была принята СРНС, названная «Навстар» (Navstar – Navigational Satellite Time and Ranging – навигационный спутник измерения времени и координат), или, по ее фактическому назначению, GPS (Global Positioning System – глобальная система местоопределения). Основные свойства обеих СРНС определяются выбором системы НС (баллистическим построением), высокой стабильностью бортовых эталонов частоты, выбором сигнала и способов его обработки, а также действенными способами устранения и компенсации ряда погрешностей.

СРНС 2-го поколения являются сетевыми системами непрерывного действия, обеспечивающими глобальное высокоточное определение полного вектора состояния П. Сеть НС развертывается из 24 спутников, координировано обращающихся по круговым орбитам высотой около 20 000 км (период обращения приблизительно 12 ч), лежащим в трёх или четырёх орбитальных плоскостях с наклоном $55\text{--}65^\circ$ так, что на каждой из орбит равномерно размещается 3–8 НС. Определение пространственных координат и составляющих скорости основывается на дальномерных и доплеровских измерениях. В настоящее время параметры СРНС подобраны так, что обеспечивается точность навигационных измерений по координатам от нескольких единиц до нескольких десятков метров, по скорости движения до 0,05 м/с, что вполне приемлемо для практических применений этих систем.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

1.1. Структура спутниковых радионавигационных систем и их основные характеристики

Среднеорбитальные СРНС GPS и ГЛОНАСС предназначены для непрерывного и высокоточного определения времени, пространственного (трехмерного) местоположения, а также вектора скорости движения космических, авиационных, морских и наземных потребителей в любой точке Земли или околоземного пространства. В настоящее время каждая из этих систем состоит из трех главных подсистем:

- 1) подсистема космических аппаратов, состоящая из навигационных спутников на соответствующих орбитах;
- 2) подсистема контроля и управления, состоящая из наземных пунктов контроля и управления;
- 3) подсистема навигационной аппаратуры потребителей.

Функционирование СРНС GPS и ГЛОНАСС осуществляется на основе беззапросных измерений псевдодальностей и радиальных псевдоскоростей до четырех или более спутников (или трех спутников при использовании дополнительной информации) с учётом информации, содержащейся в навигационных сообщениях, передаваемых в радиосигналах этих спутников. Для решения навигационной задачи из навигационного сообщения извлекаются данные о параметрах движения навигационных спутников в соответствующие моменты времени. В результате обработки этих данных в навигационной аппаратуре потребителя (НАП) обычно определяются три (две) координаты потребителя: величина и направление вектора его земной (путевой) скорости, текущее время (местное или в шкале Госэталона Координированного Всемирного Времени – UTC(SU) или, по-другому, UTC (ГЭВЧ – Государственный эталон времени и частоты России) [1].

Разработчиком системы ГЛОНАСС в целом, в том числе НС и программного обеспечения управления НС, является Научно-производственное объединение прикладной механики [1]. Разработчиком бортовой аппаратуры НС

ГЛОНАСС, подсистемы контроля и управления, а также отдельных образцов НАП является Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения. Он же обладатель патента на СРНС ГЛОНАСС. Генеральным заказчиком системы ГЛОНАСС являлись Военно-космические силы (ВКС) Министерства обороны (МО) Российской Федерации, которые длительное время осуществляли управление системой ГЛОНАСС и информирование потребителей о её состоянии через Координационный научно-информационный центр (КНИЦ ВКС МО Российской Федерации). В настоящее время управление системой ГЛОНАСС осуществляется Космическими войсками Российской Федерации. Основным документом, содержащим описание структуры и наиболее общих характеристик навигационных сигналов и сообщений системы, служит интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС [2].

Система GPS разработана по заказу и находится под управлением МО (Военно-воздушные силы ВВС) США. В интересах мирового сообщества она используется в соответствии с положениями, представленными в Интерфейсном контрольном документе GPS (ICD-2000C-002, 25.9.97), и предоставляет систему в стандартном режиме для гражданского, коммерческого и научного использования без взимания за это специальной платы [3]. Определено, что за использование системы гражданскими потребителями ответственность несёт Министерство транспорта США.

Основными разработчиками и создателями системы являются: по космическому сегменту фирмы – Rockwell International Space System Division (НКА Блок-I/II/IIA/IIF), Martin Marietta Astro Space Division (Блок-IIR); по сегменту управления – IBM, Federal Systems Company; по сегменту потребителей – Rockwell International, Collins Avionics & Communication Division.

Точность определения координат потребителя существенно зависит от условий распространения сигнала в атмосфере, манёвренности потребителя, алгоритмов обработки сигналов в НАП и ряда других факторов. Основные характеристики СРНС ГЛОНАСС и GPS приведены в табл. 1.1 [2, 3, 16].

Системные характеристики СРНС ГЛОНАСС и GPS

Параметр, способ	ГЛОНАСС	GPS
Число НС (резерв)	24(3)	24(3)
Число орбитальных плоскостей	3	6
Число НС в орбитальной плоскости	8	4
Тип орбит	Круговая($\epsilon = 0 \pm 0,01$)	Круговая
Высота орбит, км	19100	20145
Наклонение орбит, град	$64,8 \pm 0,3$	55 (63)
Драконический период обращения НС	11ч 15 мин 44 с ± 5 с	11 ч 56,9 мин
Способ разделения сигналов НС	Частотный	Кодовый
Несущие частоты навигационных радиосигналов, МГц:		
L1	1602,5625...1615,5	1575,42
L2	1246,4375...1256,5	1227,6
Период повторения дальномерного кода (или его сегмента)	1 мс	1 мс (С/А-код) 7 дн (Р-код)
Тактовая частота кода, МГц	0,511	1,023 (С/А-код) 10,23 (Р-код)
Скорость передачи цифровой информации (соответственно СИ- и D- код), бит/с	50	50
Длительность суперкадра, мин	2,5	12,5
Число кадров в суперкадре	5	25
Число строк в кадре	15	5
Система отсчётов времени	UTC(SU)	UTC(USNO) WGS-84
Система отсчёта координат	ПЗ-90	
Тип эфемерид	Геоцентрические координаты и их производные	Модифицированные кеплеровы элементы

Потенциальные характеристики точности СРНС ГЛОНАСС для удобства сведены в табл. 1.2 [1].

Потенциальные точностные характеристики СРНС ГЛОНАСС

Параметр	Точность
Сферическая ошибка по координатам, м	15
Ошибка по координатам в горизонтальной плоскости, м	8,5
Ошибка по координатам в вертикальной плоскости, м	12,5
Сферическая ошибка по скорости, м/с	0,2
Время, мкс	1

В перспективе на базе СРНС ГЛОНАСС предполагается создание Единой глобальной системы координатно-временного обеспечения (ЕС КВО). Кроме СРНС эта система будет включать Государственную систему Единого времени с эталонной базой страны; Государственную систему и службу определения параметров вращения Земли; систему наземной и заатмосферной оптической астрометрии; космическую геодезическую систему и т. д. Считается, что возможности существенного повышения точности навигационных определений связаны с созданием глобальной системы отсчёта, использующей самоопределяющиеся навигационно-геодезические спутники без привлечения измерений с поверхности Земли.

1.2. Этапы развертывания СРНС ГЛОНАСС

Теоретические предпосылки к созданию отечественной СРНС впервые были сформулированы еще до запуска первого ИСЗ в рамках исследований, проводимых группой сотрудников Ленинградской Высшей Военной Инженерной Академии под руководством академика В. С. Шебшаевича в 1955–1957 гг. [4].

Первый НС («Космос-192») отечественной низкоорбитальной спутниковой навигационной системы («Цикада»), предназначенной для нединамичных потребителей, был выведен на орбиту в 1967 г. А уже через год были проведены научные исследования по обоснованию, целесообразности и возможности создания Единой СРНС (Единой Космической Навигационной Системы), способной удовлетворить потребности любых наземных, морских, воздушных и космических потребителей с высокой точностью НВО. В качестве такой СРНС была разработана сетевая СРНС ГЛОНАСС (1972–1982 гг.).

Развёртывание созвездия НС велось поэтапно. Первый спутник СРНС ГЛОНАСС (Космос 1413) был запущен 12 октября 1982 г. К середине 1995 г. всего было запущено 65 НС ГЛОНАСС, а к 1 января 2004 г. – 86, большая часть из которых к настоящему времени уже выведена из эксплуатации.

В соответствии с указом Президента Российской Федерации от 24 сентября 1993 г. началось официальное использование системы ГЛОНАСС с промежуточным созвездием спутников. Штатная эксплуатация ГЛОНАСС началась в конце 1995 г., когда сеть НС объединила 24 рабочих спутника. Считается, что такое созвездие имеет некоторую избыточность, так как, например, даже 22-спутниковое созвездие ГЛОНАСС, созданное к середине 1995 г., обеспечивало непрерывное навигационное поле в течение суток. При этом потребители могли наблюдать от 5 до 8 спутников.

В 1996 г. Правительство России подтвердило сделанное на 10-й Аэронавигационной конференции ИКАО предложение о предоставлении мировому авиационному сообществу канала стандартной точности системы ГЛОНАСС, обеспечивающего определение координат с характеристиками точности, показанными в табл. 1.3 [5].

В отличие от системы GPS в СРНС ГЛОНАСС не предполагается использования каких-либо методов загробления точности (режим селективного доступа в GPS). Кроме того, Россия принимает все меры для обеспечения целостности и надежности обслуживания и полагает, что она будет в состоянии представить уведомление по крайней мере за 6 лет до прекращения обслуживания. Система ГЛОНАСС с полностью развёрнутой группировкой НС характеризуется вероятностью обеспечения навигационных определений не хуже 0,947 в непрерывном навигационном поле с точностью, указанной в табл. 1.3.

Точностные характеристики СРНС ГЛОНАСС, гарантируемые разработчиком

Параметр	Точность	
	Максимальная солнечная активность	Минимальная солнечная активность
Ошибка по координатам в горизонтальной плоскости, м	60	30
Ошибка по координатам в вертикальной плоскости, м	100	50

В Российском радионавигационном плане 1994 г. приведены несколько отличающиеся данные: точностные характеристики определения плановых координат, высоты и времени равны соответственно 30 м, 30 м и 1 мкс, а доступность системы — 0,98 [6]. Значение HDOP в этом случае для 93 % потребителей будет менее двух.

Расчетный ресурс спутников ГЛОНАСС первой модификации составлял не менее трех лет. Запускаемые в настоящее время НС «ГЛОНАСС-М» имеют ресурс не менее 5 лет, что позволяет повысить надёжность системы в целом. За счет использования на НС «ГЛОНАСС-М» технологии межспутниковых измерений значительно повысится время автономной работы орбитальной группировки и другие ее характеристики. Точностные характеристики определения плановых координат, высоты и времени составят соответственно 10 м, 10 м и десятки наносекунд.

1.3. Этапы развертывания СРНС GPS

Идеи использования космических аппаратов для навигации подвижных объектов в США начали развиваться после запуска в СССР в 1957 г. первого ИСЗ. В это время перед Лабораторией Прикладной Физики Университета Джона Гопкинса была поставлена задача слежения за советским ИСЗ. Она решалась посредством приёма его сигнала на наземном пункте с известными координатами, выделения доплеровского сдвига несущей частоты и дальнейшего расчета параметров движе-

ния спутника. Обратная задача расчёта координат приёмника на основе обработки принятого сигнала и координат ИСЗ представлялась очевидной и естественной [4].

На этой основе в 1964 г. была создана доплеровская СРНС первого поколения TRANSIT, отцом которой считают профессора Р. Вершнера. Координаты потребителя рассчитывались на основе приёма и выделения доплеровского сдвига частоты передатчика одного из 6–7 НКА [4].

С разработкой атомных часов в 1960 г. стало возможным использовать для целей навигации сеть точно синхронизированных передатчиков, передающих кодированные сигналы. Измерение приёмником соответствующих временных задержек позволяло рассчитать координаты приёмника. Начало реализации этого принципа было положено в 1967 г. запуском спутника ВМС США TIMATION-I.

ВВС США в 1964 г. начали программу разработки и испытаний возможностей использования для целей местоопределения широкополосных сигналов, модулированных псевдослучайными шумовыми кодами. Свойство корреляционного разделения таких сигналов обусловило возможность использования несколькими передатчиками одной несущей частоты [8].

В 1973 г. программы ВВС и ВМС США были объединены в общую навигационную технологическую программу NAVSTAR GPS. В течение первого этапа программы NAVSTAR проводилась оценка общей концепции и были разработаны НКА BLOCK I. Второй этап полномасштабной разработки и испытаний начался в 1978 г. с запуска первых четырёх НКА. В 1995 г. система оказалась практически развёрнутой [4, 9]. На сегодняшний день точность синхронизации возросла с 10^{-11} до 10^{-13} и выше. Высота орбит спутников увеличилась с 925 до 20 200 км. Несущая частота передатчиков изменилась с 400 до 1227 и 1575 МГц.

Космический сегмент образован орбитальной группировкой (ОГ), номинально состоящей из 24 основных и трёх резервных НС. НС находятся на 6 круговых орбитах высотой примерно 20 200 км, наклоном 55° , равномерно разнесённых по долготе через 60° . В каждой орбитальной плоскости четыре НКА, разнесённых по аргументу широты примерно через 90° [4].

Система GPS последовательно базируется на постоянно совершенствуемых НС BLOCK II, BLOCK IIA, BLOCK IIR.

Спутники BLOCK II являются первым конструктивным типом спутников NAVSTAR GPS, разработанных компанией ROCKWELL INTERNATIONAL. Спутники этого класса могут работать до 14 дней без взаимодействия с главной управляющей станции GPS. Девять спутников BLOCK II были запущены в период с февраля 1989 по октябрь 1990 г.

Спутники BLOCK IIA являются спутниками второго поколения, разработанными компанией Rockwell International. Они способны работать 180 дней без контактов с НКУ. В течение этого времени снижение требуемой точности оперативно устраняется путём приёма навигационных сообщений, передаваемых с каждого спутника. Запуск спутников этой группы был осуществлён с мыса Канаверел с ноября 1990 по ноябрь 1997 г. На каждом спутнике размещены два цезиевых и два рубидиевых стандарта частоты.

Спутники BLOCK IIR являются следующим поколением спутников, разработанных компанией LOCKHEED MARTIN. Спутники этой серии объединены в сеть для обмена навигационными данными между собой. Такая технология позволяет определять и обновлять ряд параметров их движения без связи с НКУ. Плановый период эксплуатации для спутников такого класса составляет 7,8 лет. На каждом спутнике размещены три рубидиевых стандарта частоты. Запуск спутников класса IIR осуществляется с января 1997 г.

Сегмент управления состоит из сети наземных станций измерения, станции управления и станций контроля, расположенных по всему миру: на островах Кваджалейн и Гавайях в Тихом океане, на острове Вознесения, на острове Диего-Гарсия в Индийском океане, а также в Колорадо-Спрингс. Главная станция контроля и управления находится на авиабазе Фалкон (Шривер) ВВС США в районе города Колорадо-Спрингс, штат Колорадо [9]. В будущем планируется создание ещё одной станции наблюдения на мысе Канаверел, штат Флорида.

На всех станциях измерения используются приёмники GPS для пассивного слежения за навигационными сигналами всех спутников. Затем информация обрабатывается на главной управляющей станции и используется для обновления эфемерид спутников. Загрузка навигационных данных, состоящих из прогнозируемых орбит и поправок часов, производится для каждого спутника каждые 24 ч. Мониторинг состояния спутников осуществляется практически непрерывно. За сутки выполняется 70–80 контактов с созвездием спутников [4].

1.4. Системы используемых координат. Частотно-временное обеспечение и шкалы времени

Эфемеридная информация, передаваемая потребителям ГЛОНАСС в составе служебной информации конкретного НС, содержит координаты фазового центра передающей антенны данного НС в геоцентрической системе координат ПЗ-90. Эта система координат, как и принятая в СРНС GPS система координат WGS-84 [3, 14], является декартовой системой координат, связанной с Землёй, т. е. ее центр «О» находится в центре масс Земли, ось OZ направлена к Северному полюсу, плоскость XOY лежит в плоскости экватора, а ось OX лежит в плоскости Гринвичского меридиана. До 1993 г. в СРНС ГЛОНАСС использовалась система координат СГС-85 [7, 15]. Несмотря на схожесть систем координат ПЗ-90 (OXYZ) и WGS-84 (AUVW), они различаются в некоторых важных параметрах. Принято сводить эти различия к некоторому повороту системы относительно оси Z или Y и смещению начала координат (рис. 1.1).

Соотношения, характеризующие переход от координат в системе ПЗ-90 к системе WGS-84, можно представить в виде матричных уравнений (1.1) (направление координат u , v , w поясняет рис. 1.1).

Смещение координат точки на земной поверхности в двух указанных системах координат оценивается по результатам измерений как не превышающее 15 м (в среднем 5 м).

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 4 \text{ м} \end{pmatrix} + 3 \cdot 10^{-6} \begin{pmatrix} 1 & -3 \cdot 10^{-6} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

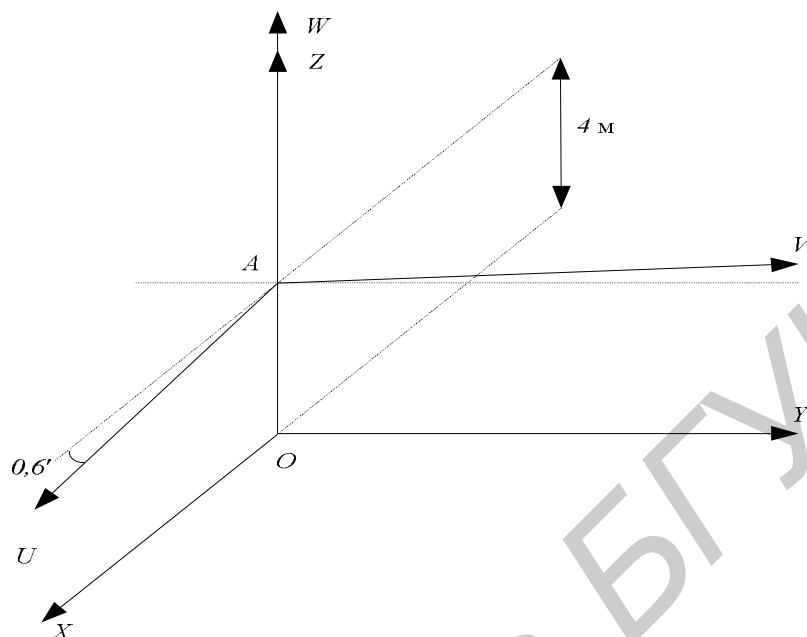


Рис. 1.1. Системы координат ПЗ-90, WGS-84

Частотно-временное обеспечение реализуется системой синхронизации, которая, в свою очередь, обеспечивает формирование единой системной шкалы времени, синхронизацию бортовых шкал времени каждого НС с системной шкалой времени (СШВ), расчёт частотно-временных поправок, определение расхождения СШВ относительно шкалы Государственного эталона координированного всемирного времени UTC (SU), расчёт поправок БШВ (бортовой шкалы времени) к СШВ, закладку поправок на борт НС (дважды в сутки) для передачи их потребителям в составе навигационного сообщения. Система синхронизации включает в свой состав [2]:

1. Цезиевые бортовые эталоны времени и частоты (БЭВЧ) НС, обеспечивающие формирование и хранение БШВ НС. Например, известно, что суточная относительная нестабильность частоты составляет $5 \cdot 10^{-13}$ для НС ГЛОНАСС и $1 \cdot 10^{-13}$ для НС ГЛОНАСС-М. Точность взаимной синхронизации бортовых шкал времени НС «ГЛОНАСС» составляет 20 нс, а спутников ГЛОНАСС-М – 8 нс. Аналогичные значения достигнуты для НС СНРС GPS.

2. Центральный синхронизатор (ЦС) системы, обеспечивающий формирование СШВ с помощью водородных стандартов частоты с суточной нестабильностью частоты не хуже $1...5 \cdot 10^{-14}$ и относительной погрешностью частоты не хуже $1 \cdot 10^{-13}$. Для системы GPS эти параметры имеют значения $3 \cdot 10^{-14}$ и $1 \cdot 10^{-12}$ соответственно (для одного из этапов использования системы).

3. Аппаратуру привязки, обеспечивающую определение расхождения СШВ и UTC(SU), которое не должно превышать 1 мс. Погрешность привязки этих шкал не должна превышать 1 мкс.

4. Систему контроля фаз (СКФ), осуществляющую активные и пассивные измерения дальности до всех НС и передачу результатов измерений на центр управления системой (ЦУС) для сверки БШВ и СШВ.

5. Контрольные станции, обеспечивающие контроль и управление БШВ и передачу частотно-временных привязок (ЧВП) на НС.

6. Программные средства вычислителей ЦУС, обеспечивающие согласованную работу подсистем, периодическое определение ухода БШВ относительно СШВ, расчёт и прогнозирование ЧВП для НС. При этом учитывается влияние релятивистских и гравитационных эффектов на формирование БШВ.

Частотно-временные поправки рассчитываются на каждом витке НС и закладываются на борт НС два раза в сутки. ЧВП представляют собой два параметра линейной аппроксимации смещения БШВ относительно СШВ, при этом погрешность прогноза БШВ на 12 ч составляет в среднем 14 нс. В НС ГЛОНАСС-М используются более стабильные цезиевые стандарты частоты, которые обеспечивают погрешность прогноза БШВ на 12 ч, равную 5 нс.

Шкала системного времени ГЛОНАСС корректируется одновременно с плановой коррекцией на целое число секунд шкалы Координированного всемирного времени UTC. Коррекция шкалы UTC на ± 1 с проводится Международным бюро времени (BIPM) по рекомендации Международной службы вращения Земли (IERS). Коррекция шкалы UTC производится, как правило, с периодичностью один раз в год (в полтора года) в конце одного из кварталов: в 00 ч 00 мин 00 с в полночь с 31 декабря на 1 января – 1-й квартал (или с 31 марта на 1 апреля – 2-й квартал, с 30 июня на 1 июля – 3-й квартал, с 30 сентября на 1 октября – 4-й квартал)

и осуществляется одновременно всеми пользователями, воспроизводящими или использующими шкалу UTC.

Следовательно, между СШВ ГЛОНАСС и UTC (SU) не существует сдвига на целое число секунд. Благодаря этому сокращается объем информации при передаче потребителям величины расхождения СШВ и UTC(SU). Между системным временем ГЛОНАСС и UTC(SU) существует постоянный сдвиг на целое число часов, обусловленный особенностями функционирования ГТКУ: $\text{ГЛОНАСС} = \text{UTC(SU)} + 03 \text{ ч } 00 \text{ мин.}$

В перспективе предполагается снизить погрешность взаимной синхронизации фаз сигналов НС до 15 нс за 24 ч, а также провести согласование СШВ GPS и ГЛОНАСС. Согласование этих ШВ основывается на высоких характеристиках шкалы UTC (SU).

Спутники ГЛОНАСС-М передают два коэффициента (B1 и B2) для перехода к шкале всемирного времени UT1 и поправку τ_{GPS} для перехода к шкале времени системы GPS. Точность определения поправки τ_{GPS} не хуже 30 нс (СКО).

2. ПОДСИСТЕМА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

2.1. Орбитальные характеристики спутников

В соответствии с целевым назначением СРНС имеет в своем составе подсистему космических аппаратов (навигационных спутников), которая представляет собой орбитальную группировку из 24 спутников. Спутники, излучая непрерывные радионавигационные сигналы, формируют в совокупности сплошное радионавигационное поле на поверхности Земли и в околоземном пространстве, которое используется для навигационных определений различными потребителями.

Структура сети спутников такова, что в каждой точке земной поверхности и околоземного пространства, в которой располагается потребитель, в любой момент времени в зоне видимости находится одновременно не менее четырех спутников, взаимное расположение и качество сигналов которых обеспечивает ему возможность координатно-временных измерений с заданными характеристиками. Требование по количественному составу орбитальной группировки обусловлено тем, что заданные точностные характеристики навигационного обеспечения могут быть получены в СРНС при наличии в орбитальной группировке, например, 21 спутника (по семь спутников в каждой орбитальной плоскости), а остальные обеспечивают «горячий» резерв и высокую устойчивость системы.

Спутники ГЛОНАСС размещаются на трех практически круговых орбитах, высоты которых – 18 840–19 440 км (номинальное значение составляет 19 100 км), что позволяет отнести ГЛОНАСС к среднеорбитальным СРНС [2]. Точность приведения спутника в заданную (рабочую) точку орбиты составляет: по периоду обращения 0,5 с; по аргументу широты 1° ; по эксцентриситету $\pm 0,01$; по наклонению орбиты $\pm 0,3^\circ$.

Орбитальные плоскости разнесены по долготе восходящего узла на 120° . При полном созвездии НС в каждой орбитальной плоскости равномерно размещается по 8 спутников с номинальным сдвигом в 45° по истинной аномалии. Спутники в соседних орбитальных плоскостях сдвинуты на 15° по значению истинной аномалии. Нумерация орбитальных плоскостей осуществляется по направлению вращения Земли, а нумерация позиций (так называемых рабочих

точек орбиты, или орбитальных точек) в последовательности спутников на орбите на определенный момент времени – против их движения. Спутники, занимающие эти позиции, часто обозначаются с помощью соответствующих (системных) номеров, совпадающих с номером позиции, несмотря на известную неоднозначность данного термина. При этом спутники с системными номерами 1–8 располагаются в первой орбитальной плоскости, 9–16 – во второй и 17–24 – в третьей.

Номинальные значения Ω абсолютных долгот восходящих узлов идеальных орбитальных плоскостей, зафиксированных на 0 ч 00 мин 00 с 1.01.83 г. (московского декретного времени), равны $251^{\circ}15'00'' + 120^{\circ}(i-1)$, где $i = 1, 2, 3$ – номер орбитальной плоскости. Идеальные значения истинных аномалий НС с системными номерами $j = N + 8$ и $j = N + 16$ отличаются от истинных аномалий НС с номерами $j = N$ и $j = N + 8$ на 15° , где $N = 1,8$ и составляют на 0 ч 00 мин 00 с 1.01.83 г. (московского декретного времени) $\nu = \omega = 145^{\circ}26'37'' + 15^{\circ}(27 - 3j + 25j^*)$, где j – системный номер НС; $j^* = \text{entier}((j - 1) / 8)$ – целая часть числа (*).

Расположение НС СНРС ГЛОНАСС по орбитальным плоскостям и рабочим точкам приведено на рис. 2.1.

При полностью развернутой группировке интервал повторяемости трасс движения НС и зон радиовидимости НС наземными потребителями составляет 17 витков (7 сут 23 ч 27 мин 28 с).

Таким образом, спутники СНРС ГЛОНАСС не имеют резонанса с вращением Земли. Период обращения спутников подобран таким образом, что приблизительно за 8 суток они совершают 17 оборотов вокруг Земли. При этом начало каждого витка смещается относительно поверхности Земли приблизительно на 21° по долготе. Каждые восемь суток спутник проходит над одними и теми же точками на поверхности Земли. За счет смещения спутников внутри орбитальных плоскостей все они движутся относительно поверхности Земли практически по одному и тому же следу (полосе). Это свойство обеспечивает высокоточное определение орбит спутников и параметров вращения Земли (ПВЗ) при использовании региональной подсистемы контроля и управления (ПКУ).

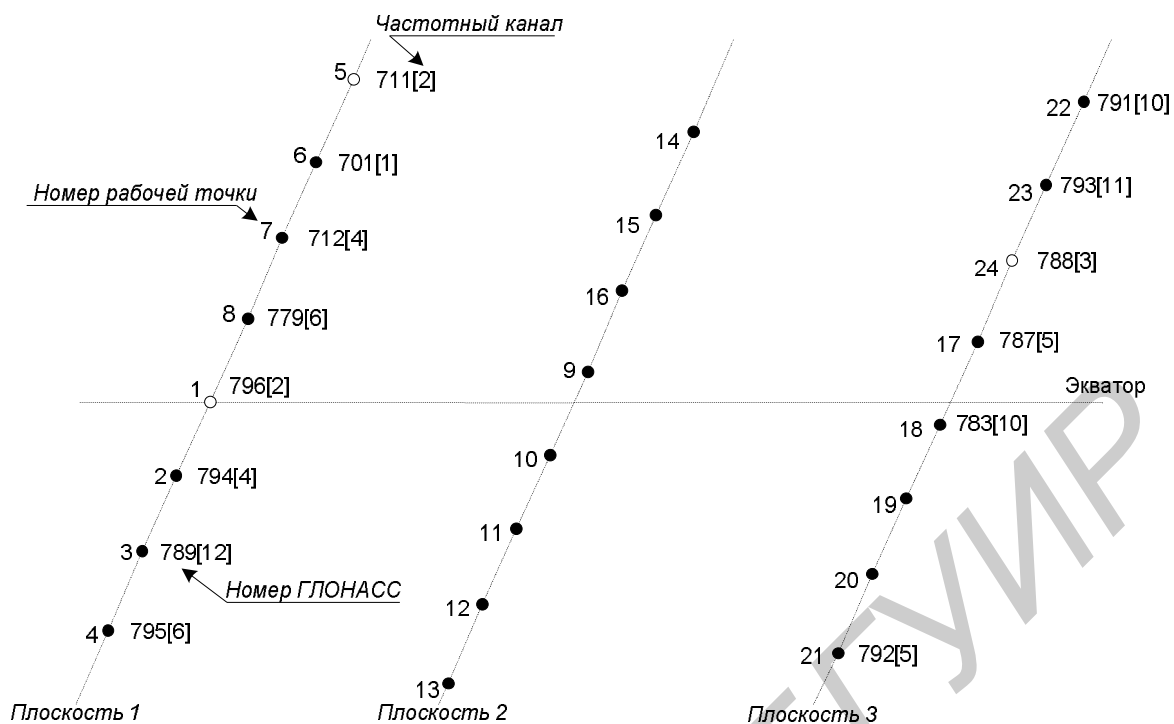


Рис. 2.1. Распределение НС СНРС ГЛОНАСС по орбитальным плоскостям

Орбитальная группировка спутников ГЛОНАСС с несинхронными почти круговыми орбитами более стабильна по сравнению с группировкой спутников GPS с синхронными 12-часовыми орбитами.

Рассмотренная структура орбитальной группировки позволяет обеспечить практически непрерывное и глобальное покрытие земной поверхности и околоземного пространства (включая ближний космос) навигационным полем с заданными характеристиками.

Доступность спутников в системе ГЛОНАСС на широтах более 50° выше, чем в системе GPS. Это связано с большим значением наклона орбит спутников ГЛОНАСС. На рис. 2.2 приведены [9, 10] расчётные зависимости вероятности P , с которой пространственный фактор ухудшения точности местопределения (PDOP) принимает заданное значение (для угла маски, равного 5° , и при нахождении в зоне видимости потребителя N спутников).

Орбитальная структура спутников ГЛОНАСС характеризуется высокой устойчивостью и не требует дополнительных коррекций в течение всего срока активного существования НС. Так, максимальные уходы НС относительно иде-

ального положения на орбите не превышают $\pm 5^\circ$ на интервале в 5 лет, а средняя скорость прецессии орбитальных плоскостей составляет $0,59251 \cdot 10^{-3}$ рад/с.

Поддержание структуры ПКА осуществляется выводением новых навигационных спутников при снижении общего числа НС (менее восьми) в любой плоскости. Запуск в заданную плоскость орбиты осуществляется по групповой схеме (три спутника одновременно) с помощью ракеты носителя ПРОТОН с космодрома «Байконур».

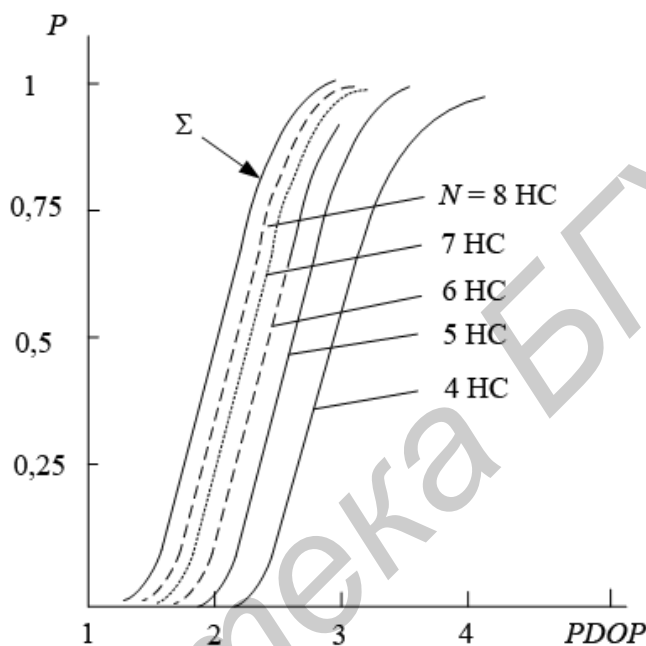


Рис. 2.2. Статистические характеристики орбитального созвездия ГЛОНАСС

Кроме того, структура сохраняет свои функциональные качества при выходе из строя до 6 НС одновременно (по два в каждой плоскости).

Использование групповой схемы выведения приводит к тому, что в каждой плоскости могут находиться избыточные работоспособные НС, которые переводятся в нештатный способ функционирования, когда целевая (навигационная) аппаратура выключена и возможна профилактика систем, так как обеспечивающие системы поддерживают штатную ориентацию НС, заданный тепловой режим и энергоснабжение.

Схема выведения НС включает: выведение космической головной части на промежуточную круговую орбиту высотой около 200 км; переход на эллип-

тическую орбиту с перигеем примерно 200 км, апогеем около 19 100 км и наклонением $64,3^\circ$; переход на круговую орбиту высотой 19 100 км.

В общем случае эксплуатация спутника предполагает следующие этапы полета:

- выведение спутника на орбиту после отделения его от разгонного блока продолжительностью от 5 до 12 витков; здесь производится проверка работоспособности всех бортовых систем;

- приведение и постановка спутника в системную точку с заданными периодом обращения и угловым положением в системной плоскости (продолжительность этого этапа – от одной недели до одного месяца и определяется угловым положением спутника в точке выведения на орбиту и системной точкой спутника);

- штатная эксплуатация спутника;

- нахождение спутника вне системы (например, при проведении профилактических и восстановительных работ по командам с ПКУ).

Реконфигурация рассмотренной орбитальной группировки ГЛОНАСС допускается в связи с ограниченными запасами топлива для двигательных установок спутника только в крайних случаях и проводится в целях оптимизации структуры и используемых частот (в целях повышения точности навигационных определений и обеспечения электромагнитной совместимости с другими системами). Орбитальные маневры проводятся на этапе установки новых спутников после их выведения на орбиту. При этом один НС остается в точке выведения, а два других разводятся в соседние рабочие точки (предварительно возможен перевод уже функционирующих НС в новую рабочую точку).

2.2. Радиосигналы в СРНС

2.2.1. Виды используемых сигналов

Каждый спутник системы ГЛОНАСС излучает фазоманипулированные навигационные радиосигналы в диапазоне $L1$ (~ 1600 МГц) и $L2$ (~ 1250 МГц) [2]. В СРНС ГЛОНАСС используется частотное разделение сигналов различных спутников в каждом из диапазонов. При этом спутники ГЛОНАСС, находящие-

ся в противоположных точках орбиты (антиподные НС), т. е. невидимые приемным потребителям одновременно, обычно передают навигационные радиосигналы на одинаковых частотах, что позволяет более рационально использовать частотный диапазон.

В СРНС GPS, в отличие от СРСН ГЛОНАСС, сигналы всех НС в каждом из частотных диапазонов $L1$ и $L2$ излучаются на одной несущей частоте, при этом используется кодовое разделение сигналов, т. е. сигнал каждого НС имеет свой дальномерный код.

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 Российской Федерации, поэтому рассматриваемые каналы можно называть открытыми и закрытыми. Иногда в иностранной литературе применительно к указанным навигационным каналам используют обозначения CSA (Channel of standard accuracy) и CHA (Channel of high accuracy) соответственно.

В отличие от сигнала стандартной точности системы GPS в системе ГЛОНАСС не предусматривается его принудительное загроуление, хотя иногда применительно к нему используется обозначение ПТ-сигнала (сигнала пониженной точности). Однако имеющиеся более низкие по сравнению с ВТ-сигналом характеристики точности можно отнести к этапу выбора параметров сигнала при разработке системы, что не связано с политикой поставщиков навигационного обслуживания в системе ГЛОНАСС на этапе ее эксплуатации. Поэтому всем пользователям ГЛОНАСС доступны измерения координат местоположения и скорости с высокой точностью. В дальнейшем более подробно будут рассмотрены структура и характеристики СТ-сигнала, передаваемого в диапазоне $L1$.

В радиолинии диапазона $L1$ с НС ГЛОНАСС в настоящее время передается только ВТ-сигнал, поэтому гражданские потребители не могут использовать метод двухчастотной компенсации ионосферных погрешностей. Этот существенный, с точки зрения гражданских потребителей, недостаток присущ и системе GPS.

В декабре 2003 г. с космодрома «Байконур» был запущен НС новой модификации ГЛОНАСС-М. Он передает навигационный СТ-сигнал не только в диапазоне $L1$, но и в диапазоне $L2$. Параметры СТ-сигнала в диапазоне $L2$ полностью аналогичны параметрам СТ-сигнала в диапазоне $L1$, излучаемого этим же НС. Отличие СТ-сигналов в диапазонах $L1$ и $L2$ НС ГЛОНАСС-М от СТ-сигнала в диапазоне $L1$ НС ГЛОНАСС состоит только в некоторых дополнительных параметрах навигационного сообщения. Остальные параметры (мощность сигнала у поверхности Земли, структура сигнала и др.) идентичны.

2.2.2. Характеристики излучаемых навигационных радиосигналов

В системе ГЛОНАСС номинальное значение рабочих частот радиосигналов НС: $f_{Li}^k = f_{0i} + k\Delta f_i$, где $i = 1,2$ – номера диапазона частот; $k = 1-24$ – номер частотного канала (литер); $f_{01} = 1602$ МГц; $f_{02} = 1246$ МГц; $\Delta f_1 = 562,5$ кГц; $\Delta f_2 = 437,5$ кГц. Отношение $f_{L2}^k / f_{L1}^k = 7/9$.

Канал $k = 0$ не предназначен для использования потребителями системы ГЛОНАСС. Он применяется наземной подсистемой управления для проверки резервных спутников на орбите при восполнении орбитальной группировки. Сведения о распределении частотных каналов $k = 1-24$ между спутниками, расположенными в орбитальных рабочих точках с номерами $m = 1-24$, содержатся в альманахе системы. В табл. 2.1 показано соответствие номинальных значений несущих частот f_{Li}^k для двух диапазонов каналам $k = 1-24$.

Навигационные СТ-сигналы с тактовой частотой 511 кГц занимают в частотном диапазоне $L1$ полосу шириной $(1602,5625 - 1615,5) \pm 0,511$ МГц.

Внеполосные излучения каждым НС за пределами полосы, отведенной для навигационных радиосигналов ГЛОНАСС, не превышают -40 дБ относительно мощности P с модулированной несущей. Навигационные ВТ-сигналы с тактовой частотой 5,11 МГц занимают в частотном диапазоне сигналов $L1$ по-

лосу шириной $(1602,5625 - 1615,5) \pm 5,11$ МГц. Соотношение спектральных характеристик сигналов в ГЛОНАСС и GPS показано на рисунке 2.3.

Таблица 2.1

План частот системы ГЛОНАСС

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			

Все радиосигналы (стандартной и высокой точности в диапазонах L1 и L2), формируемые на борту каждого НС, когерентны, так как формируются от общего БЭВЧ. 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.

Номинальное значение частоты БЭВЧ с точки зрения потребителя, находящегося на поверхности Земли, равно 5 МГц. Для компенсации релятивистских эффектов частота, формируемая БЭВЧ, смещена относительно 5 МГц на $\Delta f = 2,18 \cdot 10^{-3}$ Гц (соответствует номинальной высоте НС, равной 19 100 км). Фактические значения рабочих частот сигналов каждого НС могут отличаться от номинальных значений f_{Li}^k на относительное значение, не превышающее $\pm 2 \cdot 10^{-11}$.

С 2005 г. все находящиеся в эксплуатации навигационные спутники системы ГЛОНАСС стали использовать в качестве рабочих только каналы частот $k = -7 - +6$. Спиральные антенные элементы спутников ГЛОНАСС формируют радиосигнал, который имеет правую круговую поляризацию.

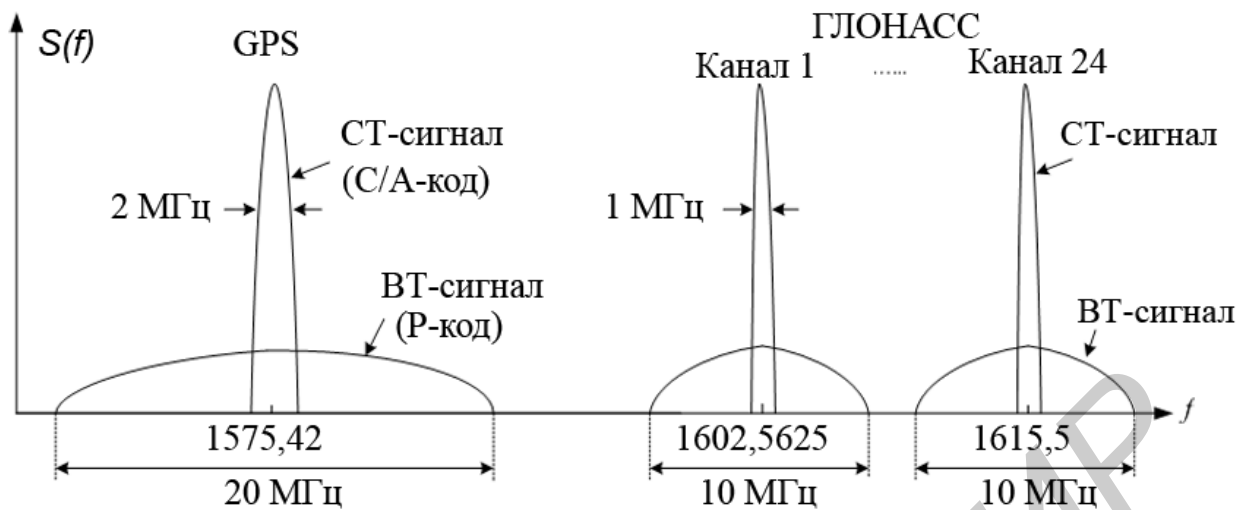


Рис. 2.3. Спектральные характеристики сигналов ГЛОНАСС и GPS

При этом коэффициент эллиптичности по полю не хуже 0,7 в обоих диапазонах излучения и в секторе излучения $\pm 19^\circ$ относительно оси симметрии диаграммы направленности (ДН) бортовой передающей антенны НС. Эти параметры сигнала учитываются при конструировании приемных антенн потребителей СРНС и при учете поляризационных потерь сигнала в радиолинии.

Характеристики модуляции сигналов. В системе ГЛОНАСС используются сложные фазоманипулированные сигналы. Фазовая манипуляция несущей осуществляется на π радиан с максимальной погрешностью не более $\pm 0,2$ рад. Для манипуляции используется цифровая последовательность 0 и 1, представляющая собой сумму по mod 2 трех цифровых последовательностей: дальномерного кода, символов навигационного сообщения и М-кода (манчестерский код, или меандровая последовательность).

В зависимости от качества модуляции может измениться стандартный вид излучаемого сигнала, что обуславливает появление потерь при корреляционной обработке сигналов в аппаратуре потребителя, которые часто называют корреляционными потерями. Наибольшие корреляционные потери, вызванные искажением формы псевдослучайного двоичного сигнала в приемнике, составляют не более 0,2 дБ, а обусловленные неидеальностью модулятора передатчика НС – 0,6 дБ.

Групповая задержка радиосигнала в аппаратуре НС. Групповая задержка радиосигнала в аппаратуре НС обусловлена зависимостью фазовой характери-

стики передающего тракта от частоты (фазочастотная характеристика). Данная групповая задержка определяется как задержка между излучаемым радиосигналом (измеряется в фазовом центре передающей антенны НС) и выходным сигналом бортового стандарта частоты. Считается, что детерминированная составляющая групповой задержки радиосигнала потребителю не важна, так как может быть заранее скомпенсирована и не влияет на ошибки определения системного времени. Максимальное значение случайной составляющей групповой задержки радиосигнала в бортовой аппаратуре НС ГЛОНАСС не превышает ± 8 нс, а для НС ГЛОНАСС-М – ± 2 нс.

Внутрисистемные помехи. 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 функциями, при обработке сигнала одного из спутников сигналы других спутников мешают и их относят к внутрисистемным помехам. Уровень последних зависит от используемых типов сигналов и принятого в системе метода разделения сигналов.

В системе ГЛОНАСС используется частотное разделение сигналов. Частотный разнос между номинальными значениями несущих частот в диапазоне $L1$ равен 562,5 кГц и выбран таким образом, что с учетом длительности элементарной посылки сигнала $\tau_s = 1/511$ мс помеховые радиосигналы от спутников, находящихся в зоне радиовидимости, могут мешать приему обрабатываемого сигнала только вторыми и последующими лепестками спектра. При этом 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.

Внутрисистемные помехи в СРНС GPS существенно больше. В GPS используется кодовое разделение сигналов и уровень внутрисистемных помех определяется значением максимального бокового лепестка кросскорреляционной функции используемых кодов. Для кодов Голда длиной 1023 элемента, применяемых в GPS, уровень максимального бокового лепестка относительно величины полезного сигнала составляет примерно $7 \cdot 10^{-3}$ ($-21,6$ дБ).

Энергетические характеристики навигационной радиолинии. Известно, что мощность радиосигнала, принимаемого потребителем от НС ГЛОНАСС, на выходе приемной линейно поляризованной антенны с коэффициентом усиления +3 дБ и при угле места 5° составляет не менее -161 дБВт для частотного диапазона $L1$ [10]. Формирование такого сигнала обеспечивается при следующих основных характеристиках навигационной радиолинии:

- мощность сигнала передатчика $P_t = 64$ Вт (18 дБВт);
- коэффициент усиления передающей антенны спутника $G_t = 10$ дБ (по центру ДН) и $G_t = 12$ дБ (в углах $\pm 15^\circ$);
- эффективная мощность излучаемого сигнала $PG_{\text{изл}} = P_t G_t = 28$ и 30 дБВт для двух указанных направлений соответственно;
- потери в свободном пространстве $L_F = 20 \cdot \log(\lambda/4\pi R) = 184,2$ дБ (для угла места НС 5°) и $182,2$ дБ (для угла места 90°) при $\lambda = 18,6$ см (средняя часть диапазона частот системы ГЛОНАСС); затухание в атмосфере $L_{\text{ат}} = 2$ дБ;
- поляризационные потери $L_{\text{пол}} \approx 1$ дБ;
- прочие потери $L_{\text{пр}} = 3-4$ дБ.

Таким образом, мощность сигнала на входе приемной антенны $P_{\text{ант}} = PG_{\text{изл}} - L_F - L_{\text{ат}} - L_{\text{пол}} - L_{\text{пр}} = -161 - -163$ дБВт (для угла места спутника 5°). При коэффициенте усиления антенны $G_a = +3$ дБ на ее выходе (а следовательно, на входе высокочастотной части приемника) получаем $P_{\text{вх}} = P_{\text{ант}} G_a = -159 - -161$ дБВт.

Энергетические характеристики условий приема сигналов в аппаратуре потребителя принято характеризовать параметром $q_c / n_0 = P_{\text{вх}} / N_0$, представляющим собой отношение мощности полезного сигнала на входе высокочастотной части приемника $P_{\text{вх}}$ к спектральной плотности (односторонней) внутреннего шума приемника N_0 . Учитывая, что $N_0 = k k_{\text{ш}} T_0$, где $T_0 = 290$ К, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана; $k_{\text{ш}}$ – коэффициент шума приемника, и полагая $k_{\text{ш}} = 2,5$, получаем $N_0 = -201,5$ дБВт/Гц; $q_c / n_0 = 10 \log(q_c / n_0) = -161 + 201,5 = 40,5$ дБГц.

Мощность радиосигнала, принимаемого потребителем от НС ГЛОНАСС-М, на выходе приемной линейно поляризованной антенны с коэффициентом усиления +3 дБ и при угле места 5° составляет не менее -161 дБВт для частотного диапазона $L1$ и не менее -167 дБВт для частотного диапазона $L2$ с последующим

доведением до уровня не менее -161 дБВт. На рис. 2.4 приведены зависимости минимальной мощности сигнала в частотных диапазонах $L1$ и $L2$, принятого потребителем, находящимся на поверхности Земли, от угла возвышения НС [3].

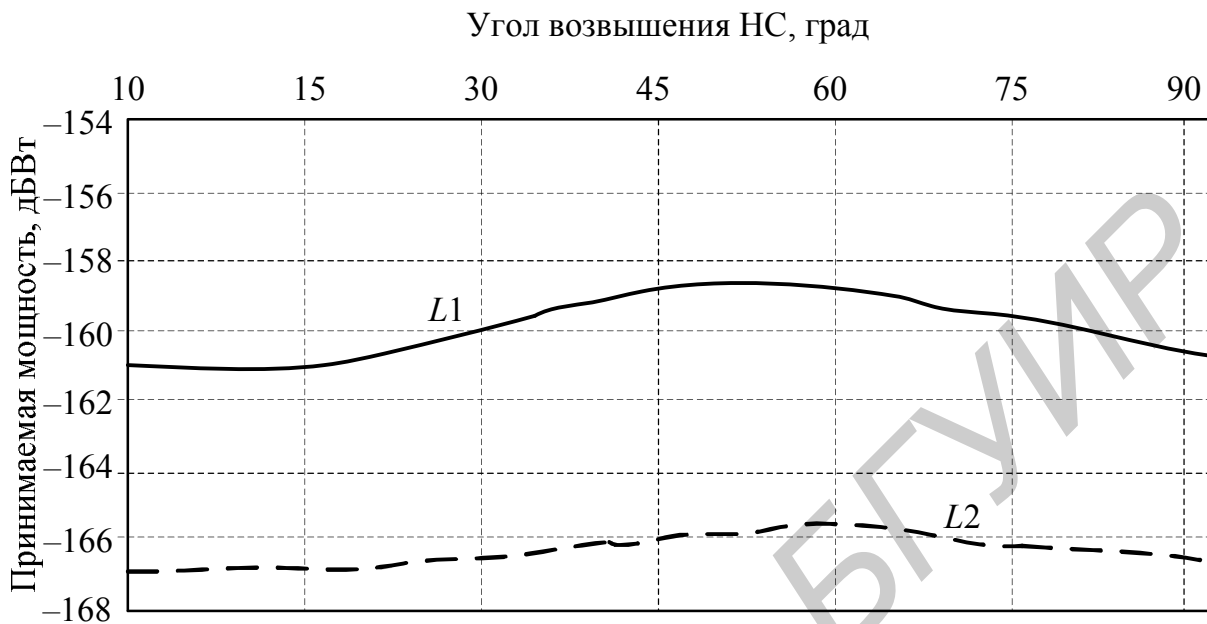


Рис. 2.4. Зависимости минимальной мощности сигнала от угла возвышения НС

Экспериментально наблюдаемое увеличение уровня принимаемого сигнала может быть обусловлено следующими причинами: отклонением высоты НС от номинального значения; ошибками угловой ориентации НС; изменением коэффициента усиления передающей антенны НС по азимутальным направлениям и по частотному диапазону; вариациями выходной мощности передатчика НС из-за технологических причин, колебаний температуры и т. д.; уменьшением потерь при распространении радиосигнала в атмосфере.

Полагают, что максимальный уровень принимаемого радиосигнала НС ГЛОНАСС не превышает $-155,2$ дБВт (потери в атмосфере $0,5$ дБ, погрешность угловой ориентации НС 1° в сторону увеличения мощности сигнала).

2.3. Характеристики модулирующих последовательностей

Навигационный радиосигнал, передаваемый каждым НС, представляет собой многокомпонентный фазоманипулированный сигнал.

Для получения высокой точности измерений задержки сигнала излучаемый

сигнал модулируется дальномерным кодом стандартной точности (СТ-код), представляющим собой периодическую последовательность максимальной длины. Для диапазона $L1$ тактовая частота формирования дальномерного кода $f_{д.к} = 511$ кГц (скорость передачи символов 511 Кбит/с), период повторения $T_{д.к} = 1$ мс.

Для передачи навигационной (служебной) информации используется модуляция двоичной последовательностью (кодом служебной информации (СИ-код)) с тактовой частотой $f_{с.и} = 50$ Гц (скорость передачи символов 50 бит/с).

Для обеспечения безошибочной работы фазового демодулятора в приемнике сигналов СРНС передаваемый сигнал подвергается относительной фазовой манипуляции, а для обеспечения процессов синхронизации в приемнике вводятся:

- модуляция меандровым колебанием (М-кодом) с тактовой частотой $f_{м.к} = 100$ Гц (скорость передачи символов 100 бит/с);
- код метки времени (МВ-код), представляющий собой двоичную псевдослучайную последовательность (М-последовательность) с тактовой частотой $f_{м.в} = 100$ Гц (скорость передачи символов 100 бит/с).

Упрощенная схема формирования модулирующей последовательности в ГЛОНАСС показана на рис. 2.5, где ФОК – формирователь относительного кода. Из рисунка видно, что модулирующий навигационный сигнал (двоичная последовательность) формируется двумя способами.

При первом способе происходит сложение по mod 2 трех двоичных сигналов: дальномерного кода стандартной точности (СТ-код); кода служебной информации (СИ-кода); меандрового колебания (М-кода).

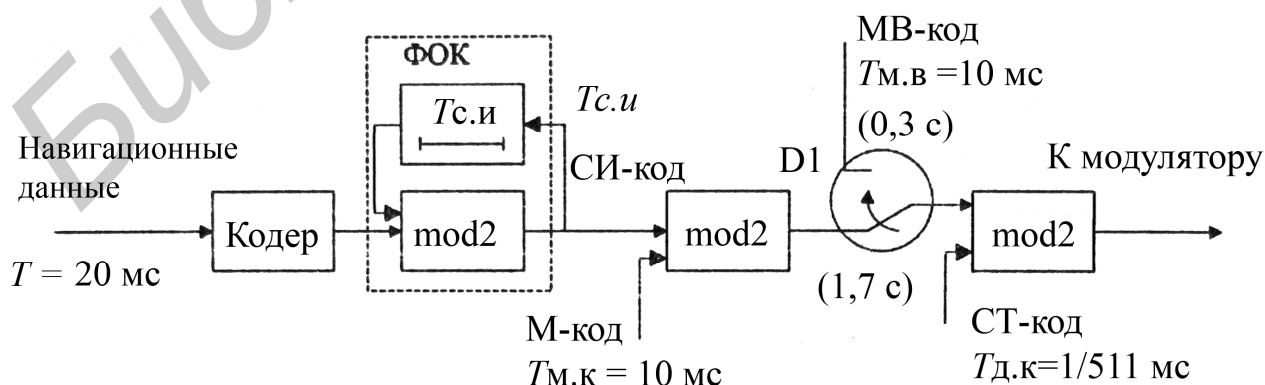


Рис. 2.5. Схема формирования модулирующей последовательности

Результирующая двоичная последовательность поступает на модуляцию несущего колебания в течение 1,7 с каждого двухсекундного интервала спутникового времени.

В течение оставшихся 0,3 с этого интервала модулирующая последовательность формируется сложением по mod 2 двух последовательностей: дальномерного СТ-кода и кода метки времени (МВ-кода).

Рассмотрим особенности формирования указанных двоичных последовательностей.

Дальномерный СТ-код представляет собой M-последовательность (псевдослучайная последовательность (ПСП)). Эта сравнительно короткая ПСП (длина $L = 511$ элементов) обеспечивает быстрый поиск дальномерного сигнала и приемлемую точность измерения дальности до НС. Порождающий полином СТ-кода: $B_{с.т}(x) = 1 + x^5 + x^9$.

Схема, поясняющая принцип формирования дальномерного кода ПСП и различных синхроимпульсов (ТС – триггеры синхронизации), показана на рис. 2.6.

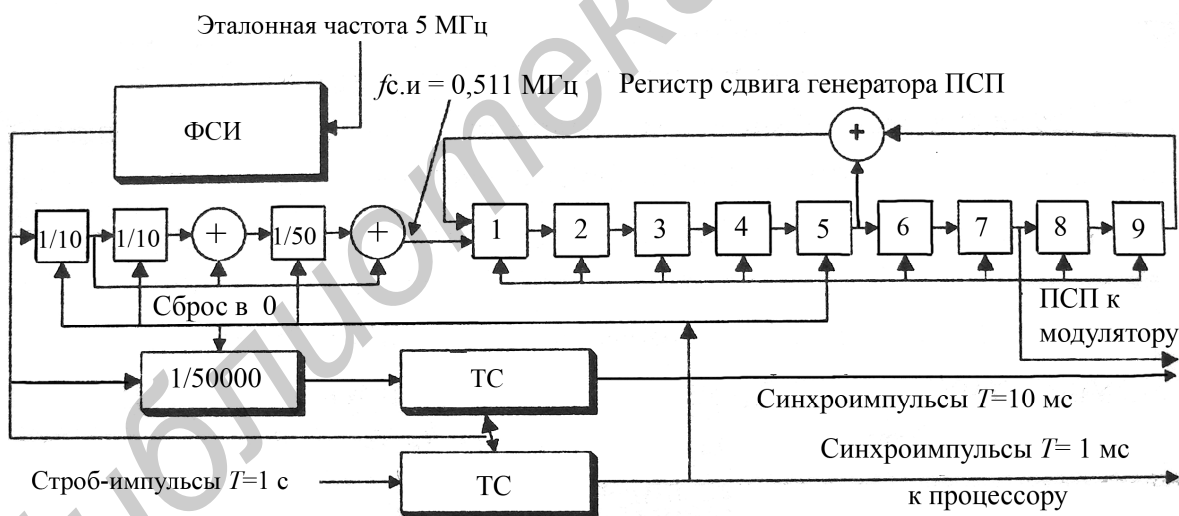


Рис. 2.6. Схема формирования дальномерного кода

Как видно из рисунка, последовательность двоичных сигналов ПСП снимается с седьмого разряда девятиразрядного регистра сдвига. Начальным символом в периоде ПСПД является первый символ в группе 11111100, повторяющийся через 1 мс.

Код служебной (навигационной) информации (СИ-код) представляет собой преобразованную цифровую последовательность навигационных данных, передаваемых аппаратурой НС потребителям системы ГЛОНАСС. Навигационные данные a_i (рис. 2.7) подвергаются помехоустойчивому кодированию в соответствии с кодом Хэмминга (85,77) (кодовое расстояние равно четырем). Выходные символы b_i кодера преобразуются в относительный код по правилу $C_i = b_i \oplus C_{i-1}$, где C_i – последовательность символов в относительном коде (длительность рассматриваемых символов $T_{с.и} = 20$ мс). Таким образом, в канале передачи навигационной информации используется ОФМ-сигнал, что исключает явление обратной работы, когда символы цифровой информации, соответствующие 1, идентифицируются как символы, соответствующие 0, и наоборот.

Результирующая двоичная последовательность навигационного сообщения (названная здесь $D1$ -код), содержащая информационные и проверочные символы в так называемом бидвоичном коде ($T_{D1} = 10$ мс), образуется, как видно из рис. 2.6, после сложения по $\text{mod}2$ последовательности символов C_i в относительном коде (СИ-код) с меандровым колебанием (М-код с длительностью символа $T_{м.к} = 10$ мс). М-код обеспечивает, в частности, простоту синхронизации по СИ-коду, содержащему серии одинаковых двоичных символов (нулей или единиц). Сигналы тактовых частот СТ-, МВ-, СИ-, М-кодов и другие синхросигналы получены делением эталонной частоты БЭВЧ $f_{о.г} = 5$ МГц, что обеспечивает когерентность формируемых последовательностей.

Код метки времени (ПСП МВ, МВ-код) представляет собой укороченную ПСП с порождающим полиномом вида $B_{м.в}(x) = 1 + x^3 + x^5$.

Длина ПСП МВ равна тридцати символам с длительностью $T_{м.в} = 10$ мс каждый. Эта характерная двоичная последовательность имеет вид 111110001101110101000010010110. Она используется как двухсекундная метка времени, так как задний фронт ее последнего символа ПСП в излученном навигационном радиосигнале является меткой времени и соответствует окончанию очередного двухсекундного интервала времени от начала суток в БШВ. Эта метка позволяет осуществлять строчную синхронизацию, а также устранять неоднозначность дальномерных измерений. Первый символ служебной информа-

ции в каждой строке всегда соответствует «0». Он является «холостым» с точки зрения передачи навигационных данных, но дополняет укороченную ПСП МВ предыдущей строки до полной (неукороченной) ПСП.

Синхронизация кодовых последовательностей осуществляется синхроимпульсами с периодами следования 1 мс, 10 мс и 1 с.

Библиотека БГУИР

3. АППАРАТУРА ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

3.1. Принципы построения аппаратуры потребителей

Навигационная аппаратура потребителей СРНС предназначена для определения пространственных координат и составляющих вектора скорости потребителя, текущего времени и других навигационных параметров в результате приема и обработки радиосигналов, излучаемых навигационными спутниками.

Современная НАП является аналого-цифровой системой, сочетающей аналоговую и цифровую обработку сигналов. Обобщенная схема НАП приведена на рис. 3.1 и включает антенну, радиочастотный блок (РЧБ), синтезатор частот (СЧ), аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифровой вычислитель (ЦВ) [1].

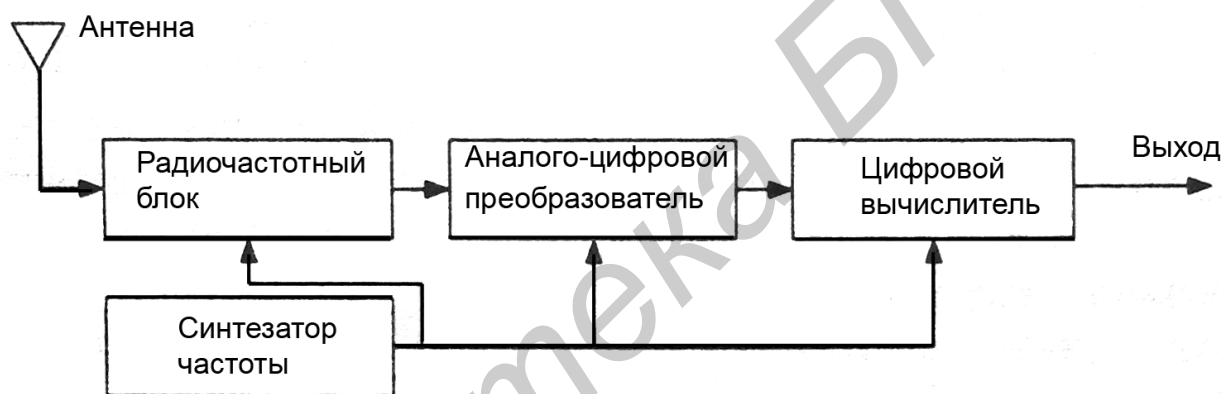


Рис. 3.1. Обобщенная схема аппаратуры потребителя

Антенна выполняет функцию преобразования электромагнитных волн в электрический сигнал и может состоять из одного или нескольких антенных элементов с необходимыми блоками электронного управления.

Радиочастотный блок (радиоприемник) предназначен для усиления принятых сигналов, частотной селекции (фильтрации) полезных сигналов из смеси с шумами и помехами, понижения несущей частоты принятых сигналов до заданного значения, которое принято называть промежуточной частотой.

Синтезатор частот формирует набор гармонических колебаний, необходимых для работы РЧБ, шкалу времени АП и тактовые сигналы, синхронизирующие работу АЦП и ЦВ.

Аналого-цифровой преобразователь трансформирует аналоговый сигнал, поступающий с выхода РЧБ, в цифровой сигнал, предназначенный для последующей обработки в цифровом вычислителе.

Цифровой вычислитель решает задачу извлечения навигационной и другой информации из принятых и преобразованных в цифровую форму радиосигналов.

По выполняемым функциям ЦВ часто представляют в виде сигнального процессора и навигационного процессора (процессора приложений). При этом сигнальный процессор выполняет задачи первичной обработки сигналов:

- распараллеливание обработки входного сигнала на n каналов;
- формирование опорных сигналов дальномерного кода и управляемых опорных генераторов (гармонических колебаний);
- корреляционную обработку сигналов в каждом из n каналов;
- поиск сигналов по задержке и частоте;
- слежение за дальномерным кодом, частотой сигналов и формирование оценок псевдодальности, псевдодоплеровской частоты и псевдофазы;
- выделение (демодуляция) навигационных данных (сообщений), передаваемых в радиосигналах;
- оценку отношения сигнал/шум q_c/n_0 для принимаемых радиосигналов;
- привязку шкалы времени потребителя к системной шкале времени СРНС.

Навигационный процессор решает задачи вторичной обработки, в том числе:

- декодирование эфемеридной информации, альманахов и т. д. из навигационных сообщений;
- оценку координат потребителя (в той или иной системе координат) и составляющих его вектора скорости;
- комплексную обработку оценок псевдодальностей, псевдодоплеровских частот (и/или псевдофаз) с данными других измерителей (инерциальных и/или доплеровских систем навигации и др.);
- пользовательские алгоритмы маршрутизации, привязки к опорным точкам, вывод в заданный район и т. д.

Практическая реализация ЦВ традиционно включает в себя жесткую аппаратную часть (многоканальный коррелятор) и программируемый вычислитель. Много-

канальный коррелятор представляет собой отдельную микросхему, в которой реализованы все необходимые для работы НАП корреляторы (несмещенные, опережающие и запаздывающие, с обычным и суженым стробом и т. д.), генераторы дальномерных кодов, управляемые опорные генераторы и схемы управления режимами работы коррелятора. В некоторых типах микросхем многоканального коррелятора реализуются также петли слежения за задержкой кода, частотой и фазой сигнала, а также схемы демодуляции навигационного сообщения. Программируемый вычислитель реализует обработку отсчетов с выходов многоканального коррелятора, следующих с относительно невысокой частотой (100... 1000 Гц) с целью решения конечной навигационной задачи, используя для этого соответствующее программное обеспечение.

В последние годы интенсивно развивается направление, основанное на полностью программной реализации ЦВ. При этом он может выполняться на программируемых процессорах общего назначения (в том числе и на персональных ЭВМ) или на цифровых сигнальных процессорах (Digital Signal Processor (DSP)). Основным достоинством такого подхода является большая гибкость при проектировании новых типов НАП, а также широкие возможности по использованию новых, перспективных алгоритмов обработки сигналов информации, например одноэтапных алгоритмов. Кроме того, при таком подходе снижаются стоимость и время разработки НАП.

3.2. Антенна навигационного приемника

Антенна навигационного приемника должна, с одной стороны, обеспечивать прием сигналов всех видимых НС, а с другой стороны, по возможности подавлять переотраженные от местных предметов спутниковые сигналы (помехи многолучевого распространения) и другие помехи. Поскольку данные требования противоречивы, к стандартным антеннам предъявляется компромиссное требование – надежный прием сигналов НС, находящихся выше 5° над горизонтом (угол маски), в предположении, что помеховые сигналы приходят с углов места, меньших угла маски. При этом коэффициент усиления антенны в рабочем секторе углов ($0-360^\circ$ по азимуту и $5-90^\circ$ по углу места) не должен меняться существенно.

Если антенна используется для двухчастотного приемника, работающего в диапазонах $L1$ и $L2$, то она должна быть широкополосной.

Типичные характеристики антенны (для рабочего диапазона частот 1570–1625 МГц) [1]:

обеспечение работы в тракте с волновым сопротивлением, Ом50
 коэффициент стоячей волны (КСВ) не более 2
 коэффициент эллиптичности антенны в зените, дБ не менее $-3,5$;
 минимальное значение коэффициента усиления G относительно изотропного излучателя с круговой поляризацией в меридиональных сечениях (как функция угла возвышения β), дБ:

$5^\circ > \beta > 0^\circ$	$-5 \geq G \geq -7,5$
$10^\circ > \beta > 5^\circ$	$G \geq -4,5$
$15^\circ > \beta > 10^\circ$	$G \geq -2,5$
$\beta > 15^\circ$	$G \geq -2$

Обычно используют *микророскоковую* антенну, достоинствами которой являются малая масса и габаритные размеры, простота изготовления и дешевизна. Такая антенна состоит из двух параллельных проводящих слоев, разделенных диэлектриком: нижний проводящий слой является заземленной плоскостью, верхний – собственно излучателем антенны.

По форме излучатель может быть прямоугольником, эллипсом, пятиугольником и т. д. Антенна обычно разрабатывается для работы на низшей резонансной моде, которая излучается в основном в верхнюю полусферу (в направлении вертикальной оси). Микророскоковая антенна имеет диаграмму направленности (ДН), обеспечивающую всенаправленный прием сигналов необходимой поляризации в верхней полусфере.

Наибольшее распространение получили микророскоковые антенны, имеющие круглый резонатор. На рис. 3.2 представлена модель круглого микророскокового резонатора, который является основным элементом антенны.

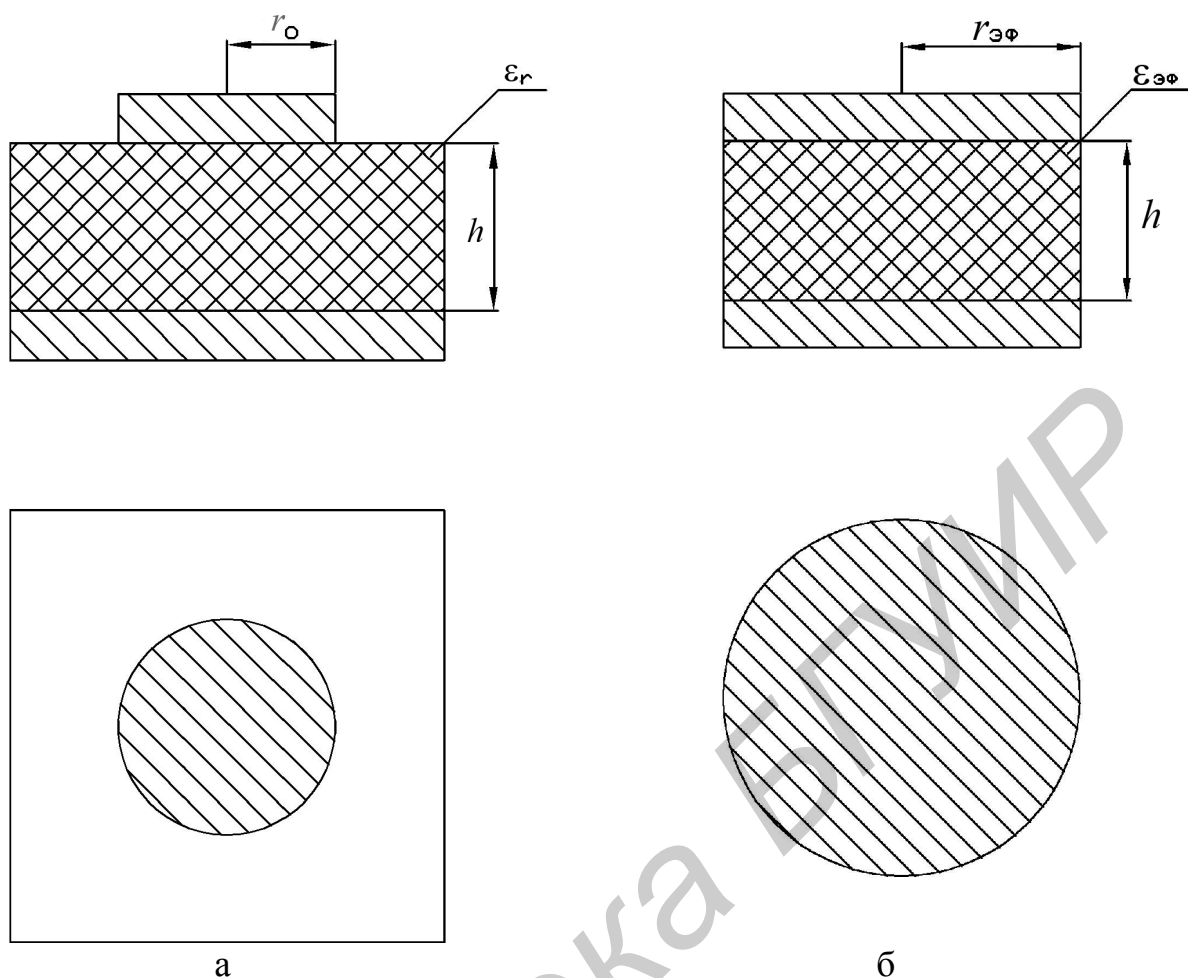


Рис. 3.2. Конструкция (а) и модель (б) круглого микрополоскового резонатора

Резонансные частоты такого резонатора рассчитываются по модели с магнитными стенками (рис 3.2, б) при $r = r_{эф}$ и диэлектрической проницаемости подложки, равной $\epsilon_{эф}$. В общем случае в подобной структуре возможно существование колебаний смешанного типа. При малой толщине подложки ($h \ll r_{эф}$) распределение вектора электрического поля вдоль оси z близко к равномерному, чем обуславливается существование колебаний квази- E_{mno} . Для модели, изображённой на рис. 3.2, б,

$$\lambda_{рез}(r_0) = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{эф} \cdot \sqrt{\epsilon_{эф}(r_0)}}{v_{m,n}} \quad (3.1)$$

где $v_{m,n}$ – n -й корень производной функции Бесселя m -го порядка;

$r_{\text{эф}}$ – радиус модели резонатора с магнитными стенками, м;

r_0 – радиус модели МПЛ резонатора, м;

$\varepsilon_{\text{эф}}$ – диэлектрическая проницаемость модели резонатора с магнитными стенками.

Параметр $r_{\text{эф}}$, м, равен

$$r_{\text{эф}}(r_0) = r_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{2 \cdot h}{\pi \cdot r_0} \cdot \left(\ln \left(\frac{\pi \cdot r_0}{2 \cdot h} \right) + 1.773 \right)}, \quad (3.2)$$

h – толщина подложки, м.

Параметр $\varepsilon_{\text{эф}}$ находится по формуле

$$\varepsilon_{\text{эф}}(r_0) = \frac{C_{a_\varepsilon}(r_0)}{C_{a_1}(r_0)}, \quad (3.3)$$

где $C_{a_\varepsilon}(r_0)$ – эффективная ёмкость резонатора для подложки с диэлектрической проницаемостью ε_r , Ф;

$C_{a_1}(r_0)$ – эффективная ёмкость того же резонатора с воздушным заполнением, Ф.

$$C_{a_\varepsilon}(r_0) = C_{\text{oa}_\varepsilon}(r_0) + C_{\text{ra}_\varepsilon}(r_0), \quad (3.4)$$

$$C_{\text{ra}_\varepsilon}(r_0) = \frac{\varepsilon_r \cdot \pi \cdot (r_0)^2}{\delta} \left[1 - \frac{J(m-1, v_{m,n}) \cdot J(m+1, v_{m,n})}{\left(J(m, v_{m,n}) \right)^2} \right], \quad (3.5)$$

$$C_{\text{oa}_\varepsilon}(r_0) = \frac{\pi \cdot r_0}{\delta \cdot h} \left[\frac{120 \cdot \pi \cdot Z_B}{Z_0^2} + \frac{2 \cdot \varepsilon_r \cdot r_0}{h} \right], \quad (3.6)$$

где $\delta = \begin{cases} 1 & \text{if } n = 0, \\ 2 & \text{if } n \neq 0; \end{cases}$

Z_B – волновое сопротивление МПЛ;

Z_0 – волновое сопротивление в свободном пространстве;

$J(m, n)$ – функция Бесселя m -го порядка.

Используя формулы (3.1–3.6), получаем зависимости резонансной частоты круглого микрополоскового резонатора от величины его радиуса. Кривые 1, 2, 4, показанные на рис. 3.2, получены для моды E_{110} при использовании материала под-

ложки с величиной $\epsilon_r = 9,6; 4,8; 2,3$. Для моды E_{210} получены кривые 3, 6, 8. Более высокие значения имеют резонансные частоты для моды E_{310} – это кривые 5, 7, 9.

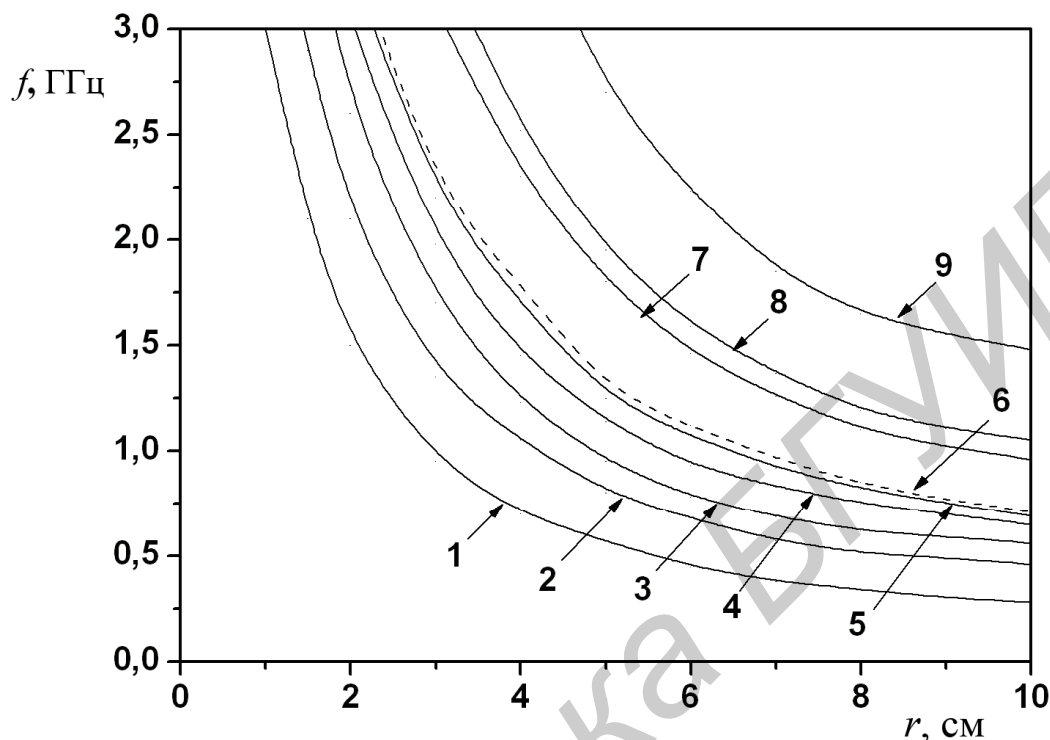


Рис. 3.3. График зависимости резонансной частоты круглого микрополоскового резонатора от его радиуса

Часто антенна интегрируется в одном модуле с предварительным усилителем, полосовым фильтром, который предназначен для обеспечения заданного значения коэффициента шума (шумовой температуры) АП, ограничения частотного спектра шумов, режекции внеполосных помех и обычно включает устройство защиты входа (УЗ), малошумящий усилитель и полосовой фильтр (рис. 3.4).

Устройство защиты входа должно предотвращать нарушение функций последующих радиоэлектронных элементов при поступлении на его вход мощных сигналов.

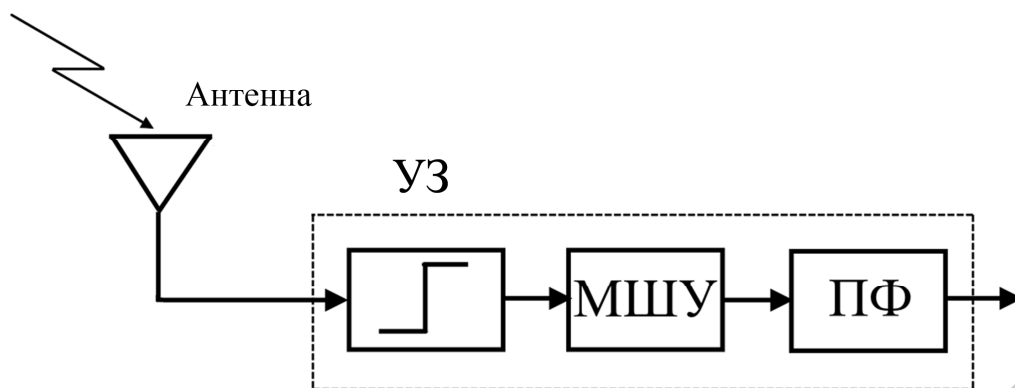


Рис. 3.4. Структура антенного модуля

Малозумящий усилитель должен иметь коэффициент шума $k_{ш} \leq 4$ дБ, работать в тракте с волновым сопротивлением $R_0 = 50$ Ом, иметь по входу и выводу КСВ ≤ 2 и обеспечивать в рабочем диапазоне частот коэффициент усиления $K_y \approx 26-30$ дБ. При выполнении данных требований шумы последующих каскадов радиоприемника практически не влияют на итоговое значение коэффициента шума АП.

Полосовой фильтр осуществляет фильтрацию сигналов в полосе частот $\Delta f = 60$ МГц (относительно несущей частоты) и подавление шумов и иных помех, действующих вне данной полосы пропускания. Параметры амплитудно-частотной характеристики ПФ выбирают в зависимости от требуемого уровня подавления внеполосных помех. Потери мощности в устройстве защиты входа составляют 1 дБ, в ПФ около 2 дБ, так что общие потери в ПУ/ПФ не превосходят 3 дБ.

3.3. Радиоприемник

Основными функциями радиоприемника АП СРНС ГЛОНАСС являются: усиление радиосигналов, фильтрация шумов и внеполосных помех, перенос сигналов на более низкую (промежуточную) частоту.

Обобщенная схема радиоприемника приведена на рис. 3.5.

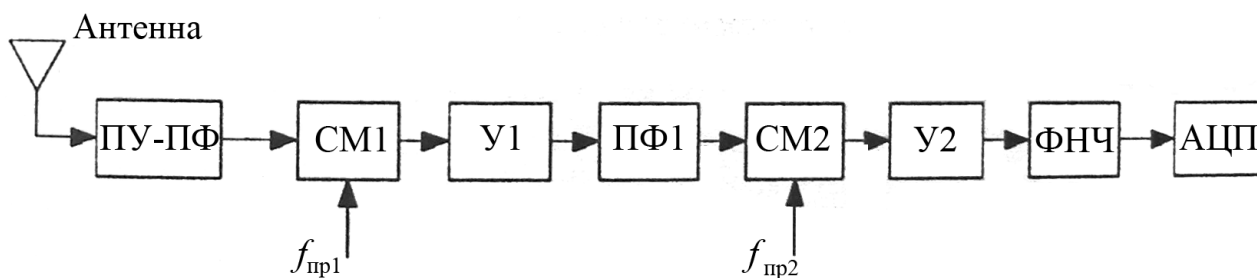


Рис. 3.5. Схема радиоприемника

В данной схеме осуществляется двукратное понижение частоты входного сигнала. Первый смеситель переносит сигнал на первую промежуточную частоту $f_{\text{пр1}} \approx 100\text{--}200$ МГц, а второй – на вторую промежуточную частоту $f_{\text{пр2}} \approx 10\text{--}40$ МГц.

Назначение ПФ – выделение полезных навигационных сигналов и режекция внеполосных помех. Например, для НС ГЛОНАСС он имеет полосу пропускания $\Delta f_{\text{ПФ1}} = 14$ МГц, что соответствует полосе частот, занимаемых радиосигналами. В качестве таких фильтров широко используются фильтры на поверхностных акустических волнах. Недостатком данного типа фильтров является достаточно большое ослабление полезного сигнала (на 20–22 дБ), что необходимо учитывать при выборе коэффициента усиления усилителя $У_1$ и при расчете общего коэффициента усиления приемного тракта.

Низкочастотный фильтр, стоящий после второго смесителя предназначен для подавления сигнальных составляющих суммарной частоты, образующихся на выходе смесителя. При больших значениях $f_{\text{пр2}}$ вместо низкочастотного фильтра можно использовать соответствующий полосовой фильтр.

Отметим, что радиоприемник на рис. 3.5 является одноканальным и переносит все радионавигационные сигналы на вторую промежуточную частоту. Задача частотного разделения радиосигналов различных НС в современных приемниках решается в блоке корреляторов путем использования различных несущих частот перестраиваемых опорных генераторов.

Рассмотрим требования к общему усилению сигналов в радиоприемнике. Ранее отмечалось, что на входе радиоприемника мощность навигационного радиосигнала составляет -161 дБВт, а спектральная плотность внутреннего шума равна $-201,5$ дБВт/Гц (при значении коэффициента шума приемника $k_{\text{ш}} = 2,5$ дБ). Полоса пропускания радиоприемника определяется полосой пропускания ПФ₁

и составляет $\Delta f_{\text{ПФ1}} \approx 14$ МГц. Следовательно, мощность шума в полосе пропускания приемника $\tilde{P}_{\text{ш}} = -201,5 + 71,5 = -131$ дБВт, а отношение сигнал/шум $\tilde{q} = 10 \cdot \log(P_c/P_{\text{ш}}) = -161 + 201,5 - 71,5 = -31$ дБ. Таким образом, полезный сигнал находится на 31 дБ ниже уровня внутренних шумов приемника. Из этого факта следует, что общий коэффициент усиления приемника следует выбирать, ориентируясь на уровень внутреннего шума приемника, а не на уровень полезного сигнала.

Полагая, что мощность внутреннего шума приемника $P_{\text{ш}}$ рассеивается на согласованной нагрузке $R_0 = 50$ Ом, можно записать

$$P_{\text{ш}} = M |u_{\text{ш}}(t)|^2 / R_0 = \sigma_{u_{\text{ш}}}^2 / R_0, \quad (3.7)$$

откуда

$$\sigma_{u_{\text{ш}}} = \sqrt{P_{\text{ш}} R_0}. \quad (3.8)$$

Сигнал с выхода радиоприемника подается на АЦП. Рабочее значение эффективного напряжения на входе типового АЦП составляет $u_{\text{АЦП}} = 0,1-0,5$ В. Так как на входе АЦП действует шумовой процесс, будем полагать $u_{\text{АЦП}} = \sigma_{\text{вх.ш.АЦП}}$. Тогда общий коэффициент усиления радиоприемника по мощности $K_{y\Sigma}$ может быть найден из условия

$$\sigma_{u_{\text{ш}}} K_{y\Sigma} = \sigma_{\text{вх.ш.АЦП}}^2, \quad (3.9)$$

тогда

$$K_{y\Sigma} = \frac{\sigma_{\text{вх.ш.АЦП}}^2}{P_{\text{ш}} \cdot R_0}. \quad (3.10)$$

Полагая $P_{\text{ш}}^* = 130,5$ дБВт, $R_0 = 50$ Ом, $\sigma_{\text{вх.ш.АЦП}} = 0,25$ В, получаем $K_{y\Sigma}^* = 10 \cdot \log(K_{y\Sigma}) = 102$ дБ. Данное значение общего коэффициента усиления включает коэффициенты усиления ПУ, U_1 , U_2 (см. рис. 3.5) и не включает потери мощности в УЗ, ПФ, ПФ₁, ФНЧ и, возможно, в СМ₁ СМ₂.

3.4. Аналого-цифровой преобразователь, опорный генератор, синтезатор частот и многоканальный коррелятор

Сигнал с выхода радиоприемника подвергается аналого-цифровому преобразованию, т. е. дискретизации по времени и квантованию по уровню.

При выборе частоты дискретизации по времени обычно исходят из того, что необходимо правильно воспроизводить суммарный спектр всех сигналов НС. Поэтому минимальное значение частоты дискретизации находится в соответствии со второй теоремой В. А. Котельникова для полосовых сигналов. Однако на практике часто идут на увеличение частоты дискретизации (например 40 МГц).

Для квантования сигналов по уровню в стандартной НАП наиболее часто применяется бинарное (1-битное) и 2-битное квантование. При бинарном квантовании используется лишь знак ($\pm \text{sign}$) входного аналогового сигнала $u(t_k)$. При 2-битном квантовании используют три пороговых уровня – уровни сравнения L , 0 и $-L$. Если в момент времени t_k значение входного сигнала $u(t_k)$ превышает значение порога L , то на выходе АЦП формируется кодовая последовательность 00; если $0 < u(t_k) < L$, то формируется код 01; если $-L < u(t_k) < 0$, то формируется код 10; если $u(t_k) < -L$, то формируется код 11.

Квантование сигналов по уровню приводит к некоторому ухудшению характеристик НАП, которое принято характеризовать энергетическими потерями в значении отношения сигнал/шум, под которыми понимают необходимое повышение значения отношения сигнал/шум (выраженное в децибелах), обеспечивающее такие же характеристики НАП при работе с квантованным сигналом, как и при отсутствии квантования. Величина потерь Π зависит от соотношения уровня входного сигнала и значения порога L . Минимальные потери (около 0,7 дБ) получаются при выборе порога $L = \sigma_{\text{вх.ш.}}$. В прецизионной НАП может использоваться АЦП с существенно большей разрядностью выходных чисел, например 12-битное АЦП.

Опорный генератор в НАП формирует шкалу времени потребителя. На его основе строится необходимая сетка частот, используемых в приемнике. В последние годы существенно возросли требования к опорным генераторам несущей частоты (ОГНЧ). В конце 90-х гг. вполне удовлетворительным считался ОГНЧ с относительной нестабильностью частоты 10^{-7} (вариация Алана). Однако в на-

стоящее время НАП с таким ОГНЧ не удовлетворяет требованиям многих приложений, например, для высокодинамичных объектов, интегрированных инерциально-спутниковых систем навигации и др.

Для улучшения технических характеристик НАП необходимо использовать высокостабильные ОГНЧ (с кратковременной относительной нестабильностью частоты 10^{-9} – 10^{-11} и ниже), что приводит к существенному удорожанию приемника. Поэтому при выборе типа ОГНЧ исходят из компромисса между характеристиками (а следовательно, и стоимостью) ОГНЧ и НАП в целом. Более детальное исследование влияния ОГНЧ на работу следящих систем НАП показывает, что необходимо учитывать не только относительную нестабильность частоты, но и более полную характеристику – спектральную плотность фазовых шумов. Значения спектральной плотности для разработанных ОГНЧ зависят от частоты следящих систем. Так, при частоте сдвига $f = 100$ Гц разработаны ОГНЧ, имеющие спектральную плотность фазовых шумов, равную $-100 - \text{минус } 140$ дБ/Гц [1]. Чем быстрее спадает спектральная плотность, тем лучшие характеристики режимов слежения в НАП могут быть получены.

Синтезатор частот строится на основе частотного плана, который определяет выбор промежуточных частот приемника, тактовую частоту АЦП, тактовую частоту работы вычислителей, необходимые прерывания для работы приложений и т. д. Частотный план должен разрабатываться для каждого конкретного приложения НАП и при его создании необходимо учитывать требования к подавлению гармоник биений, возникающих на выходах смесителей, к воздействию индустриальных и других помех, расположенных в близких частотных диапазонах, зеркальных помех и др. Важной характеристикой при разработке синтезатора является минимизация фазовых шумов, порождаемых и преобразуемых в нем. Так как в синтезаторе необходимые частоты формируются в результате умножения/деления частоты ОГНЧ в целое число раз, происходит соответствующее преобразование фазовых шумов ОГНЧ. Таким образом, проектирование синтезатора может влиять на характеристики НАП.

Схема корреляторов одного канала приема представлена на рис. 3.6 [1]. На этом рисунке обозначены: УЦГС – управляемый цифровой генератор гар-

монического сигнала, ГДК – генератор дальномерного кода, УТГ – управляемый тактовый генератор.

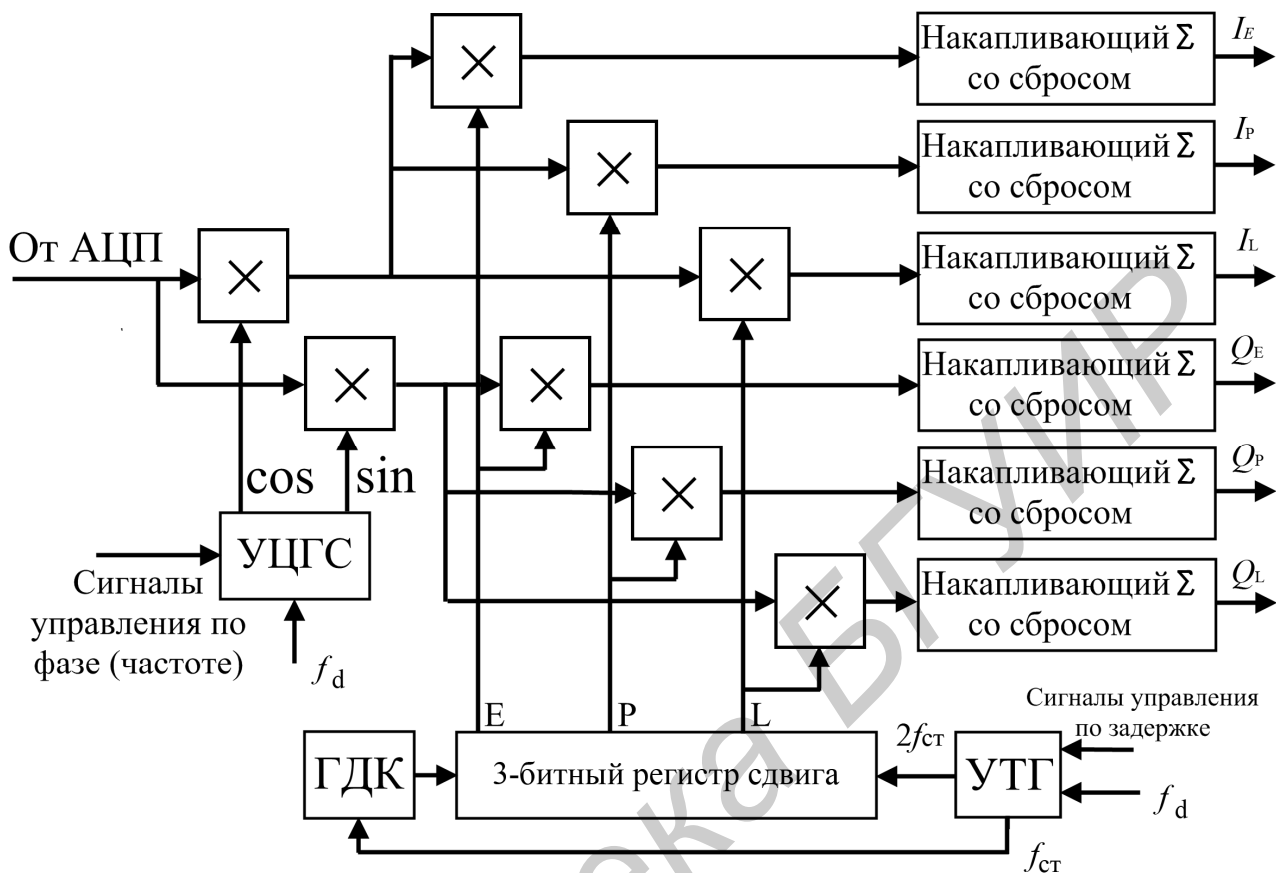


Рис. 3.6. Схема корреляторов одного канала приема

С выхода УТГ сформирована обратная связь на ГДК, который управляет работой 3-битового регистра сдвига. На управляемый цифровой генератор гармонического сигнала (УЦГС) поступают сигналы управления по фазе (частоте). Накапливающие сумматоры со сбросом формируют выходные синфазную I и квадратурную Q составляющие выходного сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебно-методическом пособии рассмотрены системы спутниковой навигации ГЛОНАСС и GPS. Анализируются виды радиосигналов, аппаратура потребителей, а также дальнейшие направления развития систем спутниковой навигации GPS и ГЛОНАСС.

В настоящее время осуществляется значительная модернизация СРНС. Одним из направлений по улучшению точностных и надёжностных характеристик является совместное использование GPS и ГЛОНАСС. С 2002 г. было положено начало созданию европейской СРНС GALILEO [12]. Другое направление включает в себя развитие спутниковых радионавигационных подсистем, использующих геостационарные космические аппараты в качестве средств передачи сигналов контроля целостности и дифференциальных поправок. Такими системами являются американская WAAS, европейская EGNOS и японская MSAS [13].

Превращение системы ГЛОНАСС в непрерывно эксплуатируемую систему предъявляет повышенные требования к надёжности функционирования ее космического и наземного сегментов и совместимости навигационных сигналов с сигналами других радиотехнических систем. Кроме того, необходимо учитывать постоянный рост требований пользователей к точности навигационного определения и целостности системы, понимая под целостностью ее способность обеспечивать предупреждение пользователей о тех моментах времени, когда система в целом или отдельные НС не должны использоваться для навигационных определений.

Модернизация СРНС ГЛОНАСС проводится и будет проводиться в дальнейшем по следующим направлениям: улучшение совместимости с другими радиотехническими системами; повышение точности навигационных определений и улучшение сервиса, предоставляемого пользователям; повышение надёжности и срока службы бортовой аппаратуры спутников и улучшение целостности системы; развитие дифференциальной подсистемы.

В СРНС ГЛОНАСС проводится постепенная замена существующей орбитальной группировки НС модификаций ГЛОНАСС на НС модификации ГЛОНАСС-М и ГЛОНАСС-К и совершенствование наземной инфраструктуры системы.

Модернизированная глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС (МГНСС) предназначена для решения следующих основных задач: непрерывного, оперативного, высокоточного навигационного и временного обеспечения неограниченного числа потребителей в любом районе земного шара, воздушного и околоземного пространства; оперативной геодезической и временной привязки объектов различного назначения; передачи поправок о расхождении шкалы времени системы относительно шкалы Госэталона и шкалы времени Госэталона относительно Всемирного времени.

В ходе модернизации системы будет обеспечена работа существующего парка АП, а также возможность работы парка АП второго поколения, разрабатываемого для работы по сигналам НС ГЛОНАСС-М и ГЛОНАСС-К на всех ее этапах.

В состав МГНСС ГЛОНАСС будут входить 24 НС (ГЛОНАСС-М и ГЛОНАСС-К) на круговых орбитах высотой 19 100 км и наклоном $64,8^\circ$. НС ГЛОНАСС-М – модернизированный навигационный спутник с увеличенным сроком активного существования не менее 7 лет. НС ГЛОНАСС-К – малый навигационный спутник с повышенными тактико-техническими характеристиками и сроком активного существования не менее 10 лет. Кроме того, предполагается модернизировать наземный комплекс управления НС и систему синхронизации. Изменению подвергнется навигационная аппаратура потребителей, включая аппаратуру привязки шкалы времени потребителей.

МГНСС ГЛОНАСС будет отвечать следующим основным требованиям:

- формированию непрерывного навигационного поля, охватывающего поверхность Земли и воздушное пространство до высот 2000 км, и «дискретного» – до высот 40 000 км, позволяющего проводить навигационные определения (для непрерывного поля) при работе по сигналу с СТ-кодом с погрешностью (СКО) не хуже: (при использовании НС «ГЛОНАСС-М») по координатам – 10 м, по высоте – 15 м, по составляющим вектора скорости – 3–5 см/с; (при использовании НС «ГЛОНАСС-К») по координатам – 7 м, по высоте – 10 м, по составляющим вектора скорости – 3–5 см/с;
- возможности привязки шкалы времени потребителя к шкале времени системы с погрешностью (СКО) не более 17 нс;

- обеспечению передачи потребителю информации о расхождении шкалы времени системы относительно Госэталона с погрешностью (СКО) не более 0,33 мкс.

При этом в системе предусматривается возможность определения поправки к шкале времени СРНС GPS относительно шкалы времени МГНСС ГЛОНАСС, а также возможность закладки этой поправки на борт НС в составе информации навигационного сообщения.

Совершенствование аппаратуры НС ГЛОНАСС будет проводиться по следующим направлениям:

- введение излучения навигационного радиосигнала в диапазоне $L3$ (~1200 МГц);

- гарантированное обеспечение излучения радионавигационных сигналов в течение всего срока активного существования;

- срок активного существования НС ГЛОНАСС-М будет не менее 7 лет, а НС «ГЛОНАСС-К» – не менее 10 лет;

- бортовой стандарт частоты, применяемый на НС, должен иметь вариацию частоты не более 10^{-13} при времени измерения 1 сутки;

- обеспечение возможности размножения на борту эфемеридной и частотно-временной информации (ЭЧВИ) по исходным данным, передаваемым с наземных средств управления, а также расчета ЭЧВИ по результатам межспутниковых измерений;

- проведение бортовым комплексом управления анализа состояния бортовой аппаратуры и выработка управляющих команд для поддержания работоспособности НС, а также формирование и передача в навигационном сообщении сигнала «Вызов НКУ», в том числе и в навигационную аппаратуру потребителя при неисправности, влияющей на качество решения целевой задачи;

- среднеквадратические погрешности эфемерид не должны превышать:
(для НС ГЛОНАСС-М) – вдоль орбиты – 5 м, в боковом направлении – 5 м, в радиальном направлении – 1 м, по составляющим вектора скорости – 0,02; 0,02; 0,17 см/с соответственно;

- (для НС «ГЛОНАСС-К») –вдоль орбиты – 3,5 м, в боковом направлении –

3,5 м, в радиальном направлении – 0,5 м, по составляющим вектора скорости – 0,02; 0,02; 0,17 см/с соответственно.

Указанные выше данные по точности должны обеспечиваться на интервале штатного и автономного функционирования для полностью развернутой орбитальной группировки с межспутниковыми измерениями (работа с бортовой аппаратурой межспутниковых измерений (БАМИ)) и при сохранении информации о параметрах вращения Земли. При работе без БАМИ указанная точность обеспечивается на интервале между очередными закладками.

Наземный комплекс управления обеспечивает решение следующих основных задач: управление навигационными спутниками орбитальной группировки; эфемеридно-временное обеспечение НС с заданной точностью, мониторинг технического состояния НС и качества излучаемых навигационных сигналов и другие задачи. При этом точность измерения текущих навигационных параметров при решении задач ЭВО должна быть не хуже (СКО) 0,17 м по псевдодальности (0,03 м при измерениях по фазе несущей) и 0,17...0,3 м по дальности.

Для решения приведенных выше задач в состав НКУ будут входить: модернизированный Центр управления системой (ЦУС-М); существующие и модернизированные командно-измерительные системы (КИС); квантово-оптические станции; средства информационно-телеметрического обеспечения; система связи и передачи данных между ЦУС-М и всеми элементами наземного комплекса управления; беззапросные измерительно-вычислительные системы; закладочно-измерительные станции.

Поскольку орбитальная группировка, кроме штатно функционирующих 24 НС, может содержать до трех резервных НС и до шести НС, находящихся в режиме выведения на орбиту, НКУ должен обеспечивать управление, информационное обеспечение и контроль орбитальной группировки в составе до 33 НС.

Для обеспечения улучшенных характеристик МГНСС ГЛОНАСС необходимо улучшать характеристики системы синхронизации, в том числе: стандарты частоты, входящие в состав центрального синхронизатора, которые должны иметь относительное среднеквадратическое отклонение частоты не более 10^{-14} при времени измерения 1 сутки; среднеквадратические погрешности

взаимной синхронизации сигналов. НС в течение интервалов автономного функционирования при штатной работе (с БАМИ) не должны превышать 3–4 нс; при работе без БАМИ – 8 нс на 12-часовом интервале после закладки. В результате определение и прогнозирование расхождения системной шкалы времени относительно шкалы времени Госэталона должно осуществляться с погрешностью (СКО) не более 0,3 мкс.

Намечены и выполняются мероприятия по модернизации системы GPS. Предполагается обеспечение передачи НКА второго открытого сигнала с C/A-кодом на частоте $L2 = 1227,6$ МГц наряду с излучением военного сигнала на этой частоте. Этот сигнал может использоваться в гражданских применениях, не критических с точки зрения безопасности. Решено также начать работы по обеспечению излучения третьего гражданского сигнала на частоте 1176,45 МГц (аэронавигационный диапазон) для применений в критических с точки зрения обеспечения безопасности подсистемах (например в авиации). Доступность этих сигналов для их реального использования будет зависеть от запусков НКА и их состояния на орбитах. К числу других основных направлений совершенствования системы GPS относится замена существующих НКА БЛОК-II (А) на НКА Блок-ИIR; разработка и изготовление 30 новых, более совершенных навигационных космических аппаратов Блок-ИIF; возможное увеличение на 6–12 НКА общего числа спутников в орбитальной группировке и доведение его до 30–36.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болдин, В. А. Глобальная спутниковая навигационная система ГЛОНАСС / под ред. В. А. Болдина, А. И. Перова, В. Н. Харисова. – М. : ИПРЖР, 1998.
2. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС // Интерфейсный контрольный документ. Редакция 5.0. – М., 2002.
3. Интерфейсный контрольный документ GPS, ICD-GPS-2000C, Navstar GPS Space Segment / User Interfaces.
4. Шебшаевич, В. С. Этапы становления и проблемы развития спутниковых РНС в СССР / В. С. Шебшаевич // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОВР. – 1991. – вып. 8.
5. Соловьёв, Ю. А. Системы спутниковой навигации / Ю. А. Соловьёв. – М. : Эко-Трендз, 2000.
6. Российский радионавигационный план // Информационный бюллетень НТЦ «Интернавигация». – 1994. – №1. – С. 17–19.
7. Характеристики системы ГЛОНАСС : качество измерений и функционирование системы // ION GPS-96. Компьютерный бюллетень BBS КНИЦ ВКС РФ.
8. Чевес, Марк. Главная управляющая станция GPS / Марк Чевес // Professional Surveyor. – 2001. – №2. – С. 5–9.
9. Shaw, Michael. Модернизация системы глобального позиционирования GPS / Michael Shaw, Kanwaljit Sandhoo, David Turner // GPS World. – 2000. – №10. – С. 26–28.
10. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / Н. М. Волков [и др.] // Зарубежная радиоэлектроника. – 1997. – №1. – С. 31–35.
11. Ivanov, N. A Ways of GLONASS system advancing / N. Ivanov, V. Salishev, A. Vinogradov // ION GPS-95. – 1995. – P. 991–1011.

12. Система Galileo. Структура частот и сигналов новой системы спутникового позиционирования / Jean-Luc Issler [и др.] // GPS World. – 2003. – №6. – С. 30–35.
13. Hansen, A. The NSTB: A Stepping Stone to WAAS / A. Hansen // GPS World. – 1998. – №6 – С. 17–20.
14. Одуан, К. Измерение времени. Основы GPS / К. Одуан, Б. Гино. – М. : Техносфера, 2002.
15. Решетнёв, М. Ф. Развитие спутниковых радионавигационных систем / М. Ф. Решетнёв // Информационный бюллетень НТЦ «Интернавигация». – 1992. – №1. – С. 17–19.
16. Андрианов, В. И. Сотовые, пейджинговые и спутниковые средства связи / В. И. Андрианов, А. В. Соколов. – СПб. : ВHV-Санкт-Петербург, Арлит, 2001.

Библиотека БГМУР

Учебное издание

Мищенко Валерий Николаевич

**СИСТЕМЫ
СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *И. П. Острикова*

Корректор *Е. Н. Батурчик*

Компьютерная верстка и дизайн обложки *Е. С. Чайковская*

Подписано в печать 22.12.2010. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 3,37. Уч.-изд. л. 3,5. Тираж 100 экз. Заказ 530.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6