
КОСМИЧЕСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ.
РАДИОЛОКАЦИЯ И РАДИОНАВИГАЦИЯ

УДК 629.783 DOI 10.30894/issn2409-0239.2018.5.3.3.16

Российская навигационно-информационная спутниковая система

В. В. Дворкин, д. т. н., *dvorkin_vv@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Р. В. Бакитко, к. т. н., *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. В. Куршин, д. т. н., профессор, *vkurshin@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Поваляев, д. т. н., профессор, *povalyaev_aa@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

ФГБОУ «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,
Москва, Российская Федерация

Аннотация. В настоящее время существует ряд проблем в дальнейшем повышении точности, доступности и надежности функционирования системы ГЛОНАСС. Эти проблемы заключаются в сложности достижения в ближайшем десятилетии значительного повышения стабильности бортовых стандартов частоты, которое сдерживает дальнейшее повышение точности системы, отсутствии надежных средств доставки корректирующей информации функциональных дополнений (ФД) ГЛОНАСС мобильным потребителям, отсутствии системы доставки беззапросных измерений текущих навигационных параметров станциями наземной сети в центр обработки для выработки корректирующих поправок и одновременно дополняющей и улучшающей характеристики точности и доступности ГЛОНАСС.

В статье рассматриваются принципы построения российской навигационно-информационной спутниковой системы, устраняющей проблемы в развитии системы ГЛОНАСС.

Ключевые слова: спутниковая навигация, космические аппараты на геостационарной и геосинхронных наклонных орбитах, корректирующие поправки функциональных дополнений ГНСС ГЛОНАСС, передача беззапросных измерений текущих навигационных параметров сети наземных станций в центр обработки

Russian Navigational and Informational Satellite System

V. V. Dvorkin, Dr. Sci. (Engineering), *dvorkin_vv@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

R. V. Bakitko, Cand. Sci. (Engineering), *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

V. V. Kurshin, Dr. Sci. (Engineering), Prof., *vkurshin@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. A. Povalyaev, Dr. Sci. (Engineering), Prof., *povalyaev_aa@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Moscow Aviation Institute (national research university), Moscow, Russian Federation

Abstract. Currently there are some issues on the further improvement of accuracy, availability and reliability of the GLONASS system. The main issues in the coming decades are the following: it is difficult to achieve a significant increase in the stability of onboard frequency standards which will restrain the further advance of the system accuracy; there are no reliable delivery means of correction information of the GLONASS augmentation system to the mobile users; the lack of delivery system of non-interrogatory measurements of current navigation performance by the ground network stations to the processing center for the correction which simultaneously completes and updates the GLONASS accuracy and availability.

The design concepts of the Russian navigational and informational satellite system designed to solve the issues in the further GLONASS system development are considered.

Keywords: satellite navigation, spacecraft on geostationary and geosynchronous inclined orbits, corrections of GLONASS augmentation system, delivery system of non-interrogatory measurements of current navigation performance by the ground network stations to the processing center

Введение. Предпосылки создания российской навигационно-информационной системы

В настоящее время в достижении целей дальнейшего развития системы ГЛОНАСС — повышения ее точности, доступности и надежности функционирования — существует ряд проблем:

- одной из основных причин, сдерживающих повышение точности системы ГЛОНАСС, является нестабильность бортовых стандартов частоты. Проблема состоит в сложности достижения в ближайшем десятилетии значительного повышения стабильности бортовых стандартов частоты;

- проблемой является достижение в ближайшей перспективе существенного увеличения частоты закладок данных навигационных сообщений, которое необходимо для повышения точности прогнозирования смещения показаний бортовых часов НКА относительно часов системы;

- проблемой является отсутствие в ГЛОНАСС систем доставки корректирующей информации ФД мобильным потребителям и доставки беззапросных измерений текущих навигационных параметров станциями наземной сети в центр обработки для выработки корректирующих поправок. Традиционно используемая доставка корректирующей информации через КА на геостационарной орбите (ГСО) не может в полной мере удовлетворить требованиям потребителей, находящихся на территории Российской Федерации. ГСО с большей части территории РФ видны под малыми углами места, поэтому неровности горизонта создают значительные препятствия уверенному приему на территории РФ сигналов с ГСО. Поэтому систему доставки корректирующей информации для РФ необходимо решать, используя КА не только на ГСО, но и на геосинхронных наклонных орбитах (ГСНО).

Решение указанных выше проблем, по мнению авторов, можно достичь с помощью создания российской навигационно-информационной системы (РНИСС), рассматриваемой в последующих разделах статьи. Дополнительно на РНИСС предполагается возложить и навигационные функции, которые позволяют улучшить характеристики точности, надежности и доступности системы ГЛОНАСС.

Архитектура построения РНИСС

РНИСС так же, как и обычные глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), состоит из трех подсистем: наземной подсистемы управления, подсистемы КА и подсистемы потребителей. Архитектура построения наземной подсистемы РНИСС показана на рис. 1. Она включает комплекс формирования наземной шкалы времени (ШВ), в соответствии с которой осуществляется синхронизация всех наземных средств: центра управления и обработки данных, наземных комплексов запросных и беззапросных измерений текущих навигационных параметров (ИТНП), наземного комплекса метеоданных и комплекса станций излучения сигналов, сформированных на Земле, в направлении КА ГСО и ГСНО РНИСС.

Центр управления и обработки РНИСС обрабатывает данные наземных комплексов запросных и беззапросных ИТНП и формирует на этой основе данные навигационных сообщений для каждого КА РНИСС. Эти сообщения объединяются с корректирующими поправками ФД ГЛОНАСС и данными навигационных сообщений спутников ГЛОНАСС, образуя тем самым общий набор данных для каждого КА РНИСС. Корректирующие поправки ФД ГЛОНАСС вычисляются в центре сбора измерений и вычисления корректирующих поправок ФД ГЛОНАСС, передаваемых в центр сбора через КА ГСО РНИСС.

Комплекс земных станций (ЗС), изображенных в верхней левой части рис. 1, излучает сигналы, синхронизированные с наземной ШВ, в направлении КА ГСО и ГСНО РНИСС. Эта синхронизация позволяет восстановить на КА РНИСС наземную ШВ, задержанную на время распространения сигналов.

Центр сбора измерений и вычислений корректирующих поправок ФД, наземные комплексы запросных ИТНП и метеоданных, уже существующие в ГЛОНАСС, могут быть использованы в РНИСС после их модернизации.

В статье представлены два варианта построения бортовой аппаратуры КА РНИСС. В первом варианте все навигационные сигналы формируются на Земле, а бортовая аппаратура просто осуществляет их ретрансляцию. Во втором варианте

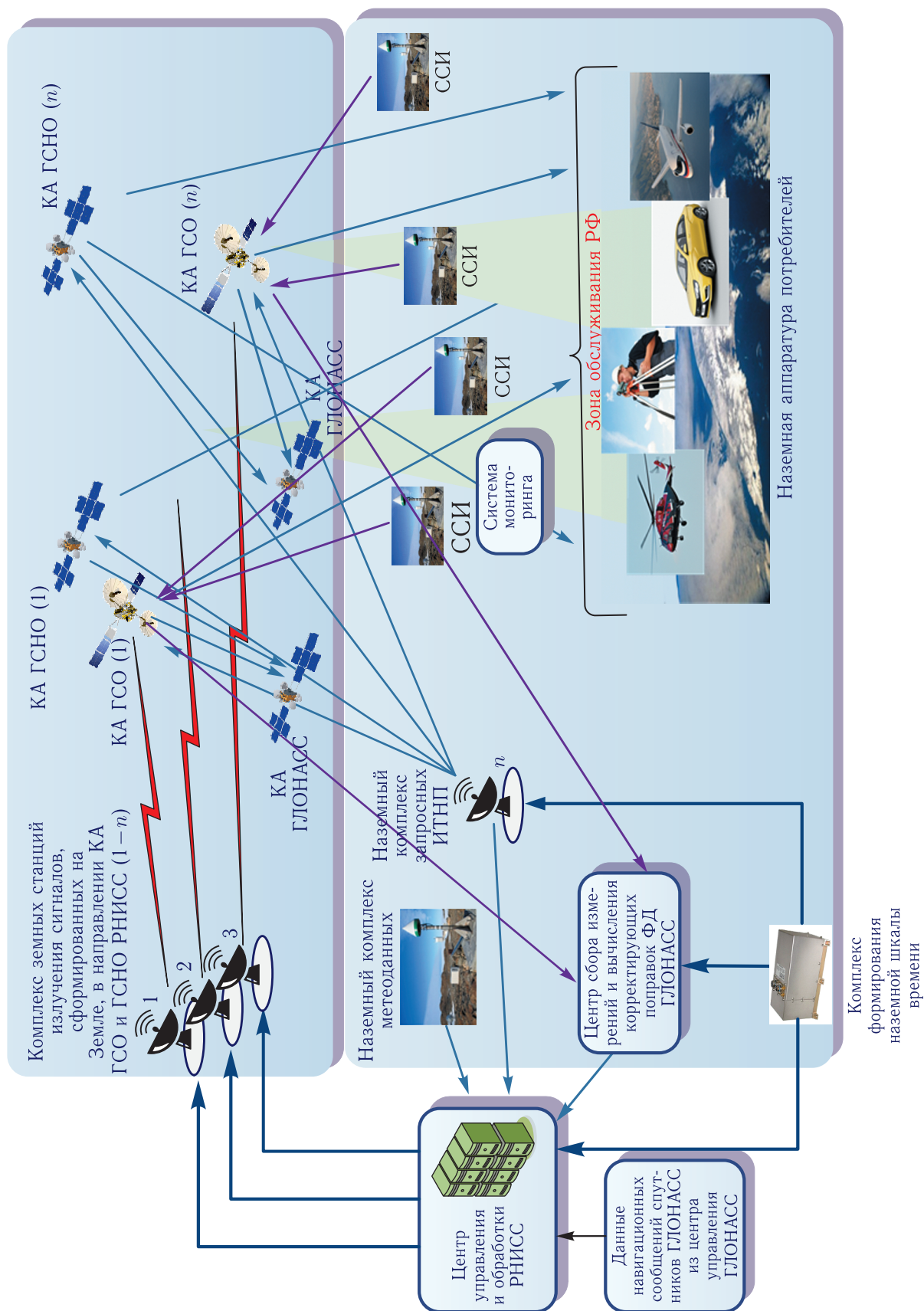


Рис. 1. Архитектура построения РНИСС

с Земли передается пилот-сигнал, синхронизированный с наземной ШВ, позволяющий восстановить на КА РНИСС наземную ШВ, задержанную на время его распространения, и соответствующий каждому КА РНИСС общий набор данных. На борту каждого КА РНИСС осуществляется формирование навигационных сигналов, синхронизированных с задержанной наземной ШВ, промодулированных данными своего навигационного сообщения. Сформированные таким образом навигационные сигналы излучаются для их приема потребителями. Часть сигналов КА РНИСС выделяется для передачи потребителям корректирующей информации в стандарте SBAS для системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ), а также для передачи корректирующих поправок в стандарте RTCM 10403.3 для системы высокоточного местоопределения.

С целью увеличения частоты обновления данных навигационных сообщений НКА ГЛОНАСС в обоих вариантах данные навигационных сообщений этих НКА передаются по межспутниковым радиолиниям (МРЛ) передачи информации с КА ГСО РНИСС на спутники ГЛОНАСС. Увеличение частоты этого обновления позволяет повысить точность прогнозирования координат НКА ГЛОНАСС. Такая передача возможна вследствие того, что высота орбит КА ГСО РНИСС почти вдвое превышает высоту орбит КА ГЛОНАСС (см. следующий раздел данной статьи), и поэтому КА ГЛОНАСС всегда будут находиться в зоне видимости КА ГСО РНИСС. Это позволяет достаточно часто осуществлять обновление содержимого навигационных сообщений КА ГЛОНАСС.

Для решения проблемы оперативной доставки в центр обработки беззапросных измерений, осуществляемых сетью наземных ССИ, предполагается в составе бортовой аппаратуры КА РНИСС на ГСО расположить ствол ретранслятора, через который будет осуществляться ретрансляция ИТНП, осуществляемых станциями этой сети, в центр обработки. Указанный ствол может быть использован также и для передачи дополнительной информации, например в авиационных приложениях, передачи спецпотребителям ключей для вхождения в сеанс навигации по сигналам санкционированного доступа, сигналов управления низкоорбитальными спутниками и т. д.

Из рис. 1, а также из последующих пояснений к этому рисунку следует, что РНИСС в навигационном смысле является системой, улучшающей характеристики ГЛОНАСС по точности и доступности навигационного обеспечения. Это улучшение достигается путем использования единой наземной ШВ времени РНИСС и ГЛОНАСС и излучения с КА РНИСС навигационных сигналов, совместимых с навигационными сигналами ГЛОНАСС. Улучшение достигается также введением в состав навигационных сигналов, излучаемых КА РНИСС, дополнительного навигационного сигнала в S-диапазоне, отличном от L-диапазона, в котором излучаются все навигационные сигналы ГЛОНАСС.

Структура орбитальной группировки РНИСС

Возможны следующие этапы построения РНИСС. Этап региональной РНИСС, предназначенной для обслуживания территории РФ и сопредельных государств, и этап глобальной РНИСС, охватывающей весь земной шар, за исключением областей, прилегающих к Южному полюсу.

Основными требованиями при выборе орбитальной группировки (ОГ) как самостоятельной навигационной спутниковой системы для региональной РНИСС являются:

- обеспечение трехмерного местоопределения на территории РФ;
- обеспечение двукратного покрытия территории РФ зонами видимости геостационарных спутников (ГСО) (без учета северных приполярных районов);
- осредненный пространственный геометрический фактор PDOP (Positioning Delusion of Precision) для территории РФ не должен превышать 2;
- приемлемое (по численности) число КА группировки РНИСС.

Выполнение вышеперечисленных требований возможно при условии построения ОГ РНИСС на основе ГСО и ГСНО. КА с этими типами орбит используются в японской региональной спутниковой системе QZSS [1] и китайской ГНСС BeiDou [2].

Таблица 1. Параметры ОГ 4ГСО + 6ГСНО_0.3

Тип орбиты	Долгота висения, (средняя аномалия), град	Аргумент перигея, град	Большая полуось, м	Наклонение, град	Эксцентриситет	Долгота восходящего узла, град
ГСО	70	0	42162800	0	0	0
ГСО	80	0	42162800	0	0	0
ГСО	140	0	42162800	0	0	0
ГСО	150	0	42162800	0	0	0
ГСНО	0	269	42162800	64,8	0,3	140
ГСНО	120	269	42162800	64,8	0,3	20
ГСНО	240	269	42162800	64,8	0,3	260
ГСНО	60	269	42162800	64,8	0,3	140
ГСНО	180	269	42162800	64,8	0,3	20
ГСНО	300	269	42162800	64,8	0,3	260

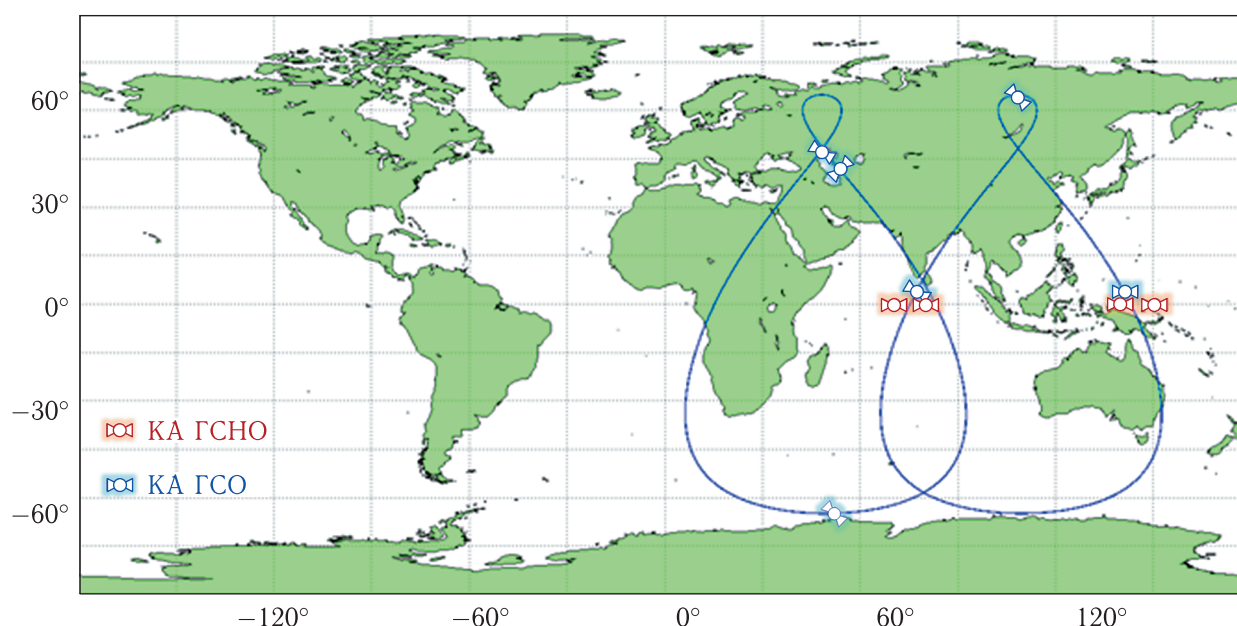


Рис. 2. Трассы подспутниковых точек ОГ 4ГСО + 6ГСНО_0.3

Путем моделирования определено использование в региональной ОГ РНИСС 4 КА на ГСО и 6 КА на ГСНО с эксцентриситетом $\sim 0,3$. Эта ОГ далее будет обозначаться как 4ГСО + 6ГСНО_0.3. Параметры ОГ 4ГСО + 6ГСНО_0.3 приведены в табл. 1.

В ОГ 4ГСО + 6ГСНО_0.3 геосинхронные спутники располагаются в трех плоскостях — по два

в каждой. Трассы подспутниковых точек этой ОГ показаны на рис. 2.

Оценки СКО навигационных определений предлагаемой ОГ представлены на карте точности, показанной на рис. 3. СКО псевдодальномерных измерений при построении этой карты полагалась равной 0,35 м. Минимальный угол видимости спутника над горизонтом принимался равным 5° .

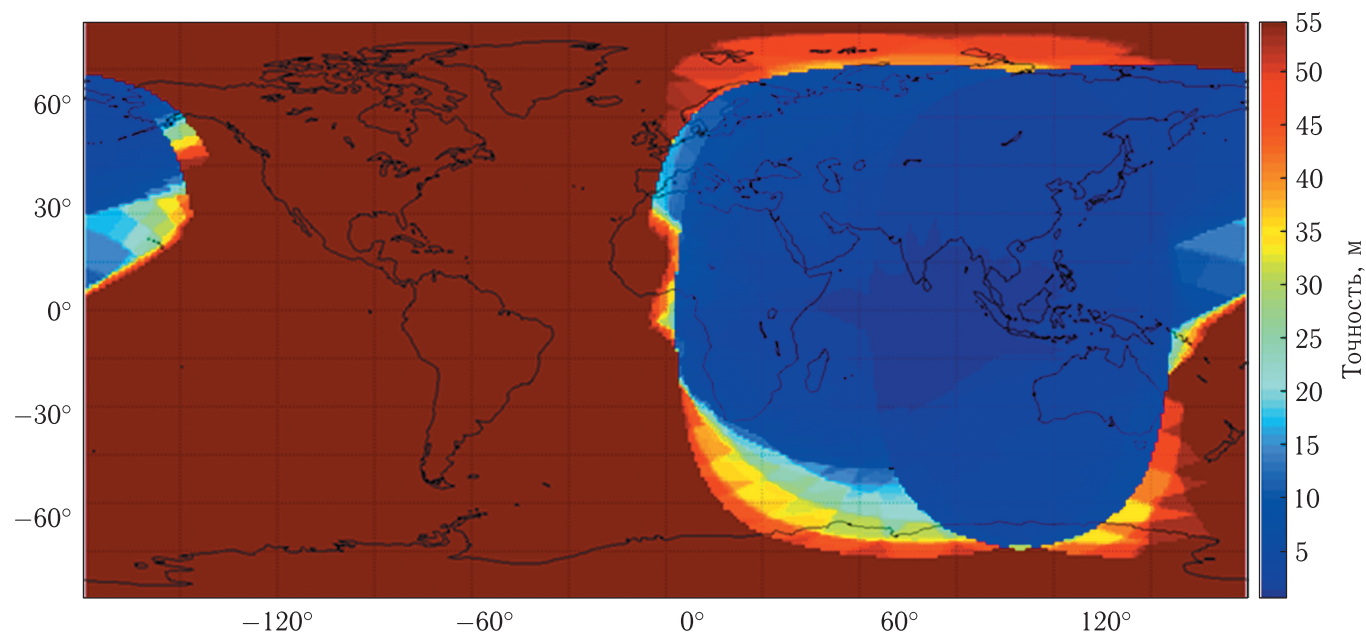


Рис. 3. Карта точности навигационных определений ОГ 4ГСО + 6ГСНО_0.3 с доверительной вероятностью $P = 0,95$ м

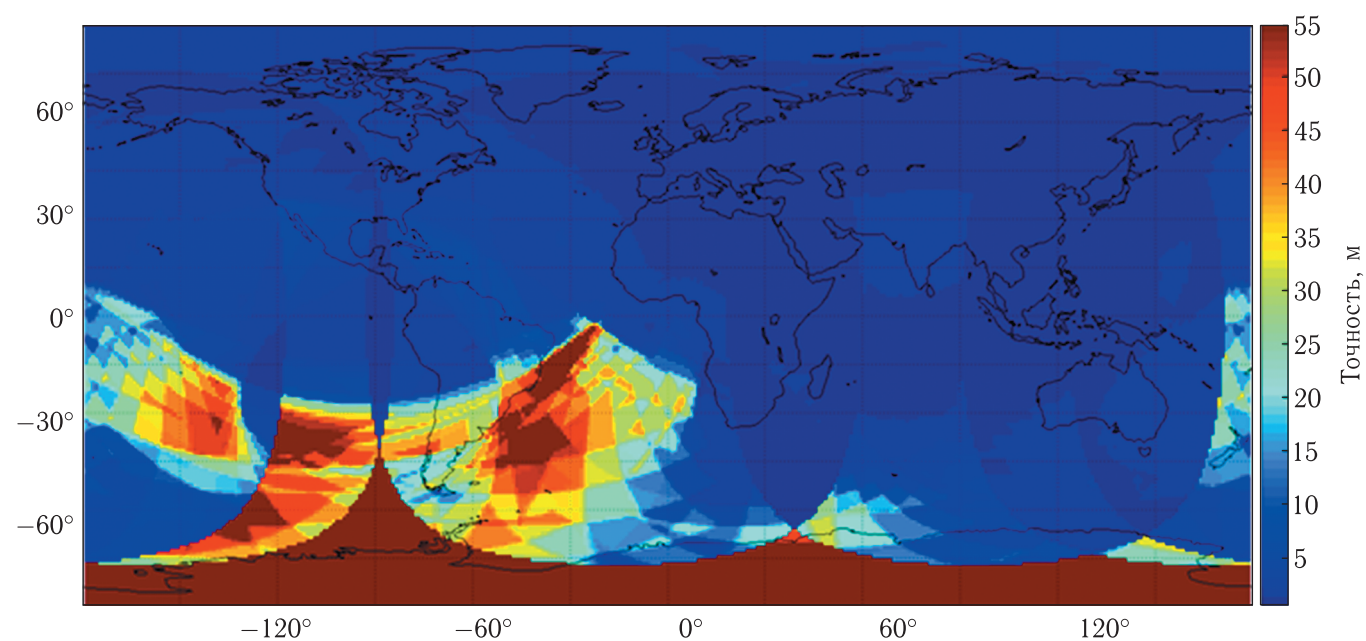


Рис. 4. Карта точности навигационных определений 4ГСО + 12ВЗО_0.3 с доверительной вероятностью $P = 0,95$ м

Для создания глобальной РНИСС необходимо дополнить ОГ 4ГСО + 6ГСНО_0.3 еще 6-м КА на ГСНО.

На рис. 4 приведена карта точности навигационных определений в глобальной РНИСС с ОГ

4ГСО + 12ГСНО_0.3 по уровню доверительной вероятности $P = 0,95$.

В табл. 2 приведены средний PDOP (95 %), вероятность А-доступности (присутствия в зоне видимости не менее 4 КА), СКО навигационных

Таблица 2. Характеристики навигации на основе РНИСС

	4ГСО + 6ГСНО_0.3		4ГСО + 12ГСНО_0.3	
	Россия	Глобально	Россия	Глобально
Средний PDOP (95 %)	4,8	29,8	1,9	7,6
A (PDOP ≤ 6)	0,51	0,46	1,0	0,91
A (PDOP ≤ 2)	0,20	0,04	0,53	0,18
Точность навигации, ($P = 0,95$) м	3,5	52,8	0,9	9,5

определений при доверительной вероятности $P = 0,95$ для региональной и глобальной РНИСС.

уже о ремонтпригодности и возможности резервирования таких стандартов.

Возможности и преимущества использования наземных стандартов частоты

Погрешность местоопределения вдоль направления на спутник, порождаемая относительной нестабильностью частоты бортового стандарта 1×10^{-14} , в ГНСС составляет величину около 0,25 м [3].

В то же время, по оценкам, приведенным в [3], для транспортируемого образца оптического стандарта частоты объемом порядка 1 м^3 суточная нестабильность на уровне 10^{-17} – 10^{-16} является в настоящее время вполне достижимой и уже продемонстрирована рядом лабораторий [4, 5]. В 2017 году Министерством образования и науки РФ поддержан проект 14.610.21.0010 «Разработка генератора ультрастабильных опорных сигналов частоты на холодных ионах иттербия для повышения на порядок точности геопозиционирования, космической навигации и формирования новых сегментов массового спроса на рынке приложений глобальной спутниковой навигации» с суточной стабильностью порядка 5×10^{-17} , задачей которого является создание компактного (1 м^3) стандарта частоты на одиночном ионе иттербия. Для реализации этой задачи сформирован консорциум ключевых исполнителей РКС–ФИАН–СКОЛТЕХ–ИЛФ СО РАН–АВЕСТА.

Расположить на борту КА стандарт частоты объемом 1 м^3 не представляется возможным, однако в земных условиях использование такого стандарта может быть легко реализовано, не говоря

Состав и характеристики сигналов, излучаемых КА РНИСС

В соответствии с архитектурой построения РНИСС, рассмотренной в разд. 2, КА РНИСС должны излучать следующие сигналы:

- навигационные сигналы ГЛОНАСС с кодовым разделением в диапазонах L1 (1600,995 МГц), L2 (1248,05 МГц), L3 (1202,025 МГц);
- сигнал передачи корректирующих поправок L3ВАМО (1202,025 МГц) в стандарте RTCM для систем высокоточного местоопределения;
- навигационный сигнал в диапазоне S (2491,005 МГц), выделенном международным союзом электросвязи для ГНСС;
- сигналы L1SBAS (1575,42 МГц) и L5SBAS (1176,45 МГц);
- сигналы МРЛ в диапазоне S (2212,25 МГц);
- сигнал ретранслятора на КА ГСО для доставки в диапазоне С (вверх 6425–6450 МГц, вниз 3600–3623 МГц) в центр обработки беззапросных измерений, осуществляемых сетью наземных ССИ, а также для передачи информации других типов со скоростью ~ 500 кбит/с [6].

Спектры сигналов, излучаемых КА РНИСС, показаны на рис. 5.

В соответствии со стандартом SBAS информационный сигнал L1SBAS может излучаться только с КА на ГСО и поэтому его излучение с КА на ГСНО не предусматривается.

В проекте ИКД сигнала L5SBAS [7] не оговаривается тип орбиты КА, с которого этот сигнал

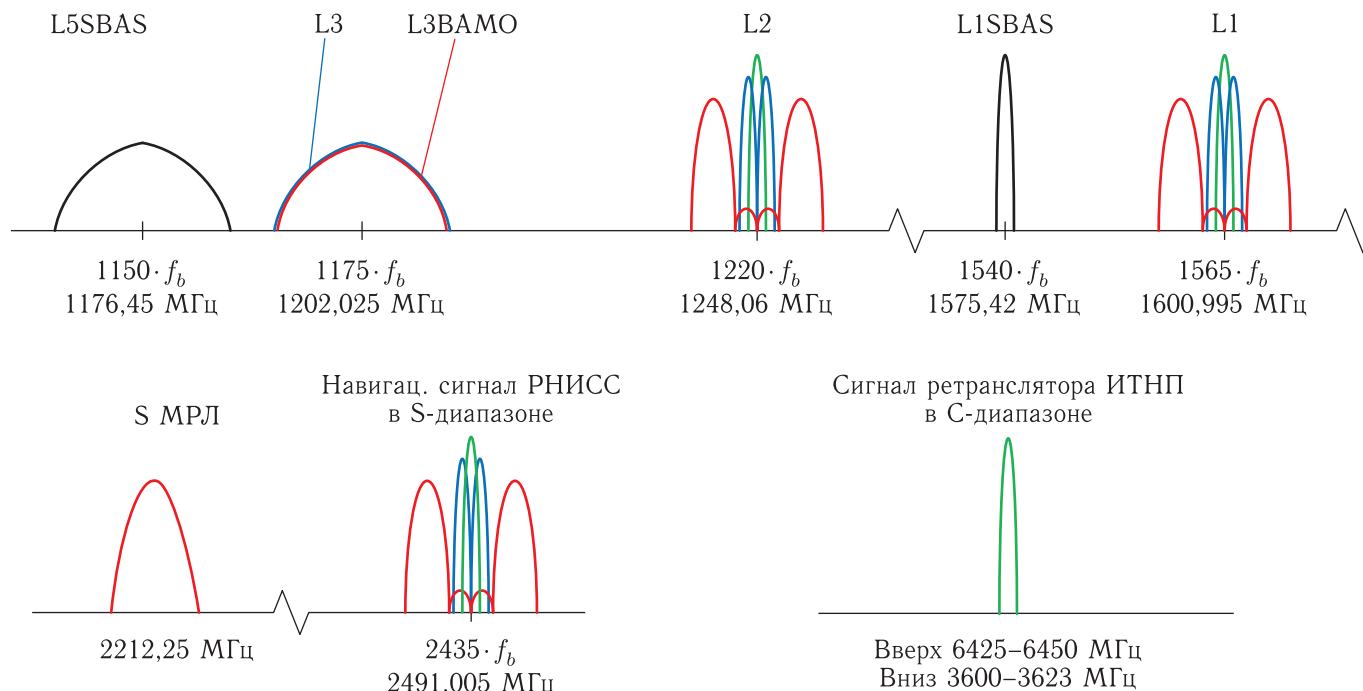


Рис. 5. Спектры сигналов, излучаемых КА РНИСС

может излучаться, т.е. принципиально его можно излучать как с КА на ГСО, так и с КА на ГСНО. Однако для того, чтобы не перегружать количеством сигналов КА на ГСО, излучение сигнала L5SBAS предусматривается только с КА на ГСНО.

Сигнал передачи корректирующих поправок L3ВАОМО (1202,025 МГц) должен уверенно приниматься подвижными потребителями во всей зоне обслуживания РНИСС. Сигналы же, излучаемые КА ГСО РНИСС, принимаются в северных широтах РФ под малыми углами места и поэтому могут затеняться всяческими неровностями горизонта. В этой связи сигнал передачи корректирующих поправок L3ВАОМО (1202,025 МГц) предусматривается передавать только с КА ГСНО РНИСС.

Техническая реализация ретрансляции сигналов доставки в центр обработки беззапросных измерений, осуществляемых сетью наземных ССИ, через КА на ГСНО представляется неоправданно сложной. КА на ГСНО движутся относительно земной поверхности, и поэтому для ретрансляции сигналов наземных ССИ через такие КА необходимо каждую ССИ оборудовать сложной полноприводной антенной либо фазированной антенной решеткой, отслеживающей направление на КА на ГСНО. С учетом

того, что необходимое количество ССИ в глобальной наземной сети, осуществляющих беззапросные измерения, может приближаться к сотне, надежная и экономически обоснованная эксплуатация такой сети представляется очень проблематичной, тем более что по оценкам [8] стоимость фазированной антенной решетки либо антенны на гироскопических платформах составляет величину порядка \$ 800–1200 против \$ 8–10 обычной параболической антенны. В то же время доставка в центр обработки беззапросных измерений, осуществляемых сетью наземных ССИ, является фиксированной связью. Это означает, что антенны ССИ всегда можно расположить таким образом, чтобы неровности линии горизонта не препятствовали надежной передаче измерений со станции на ГСО. Учитывая, что вся материковая часть РФ, включая полуостров Таймыр с мысом Челюскин, лежит южнее 76–78° с. ш., доставку в центр обработки беззапросных измерений, осуществляемых сетью наземных ССИ, в РНИСС предлагается осуществлять только через КА на ГСО. В качестве метода доступа большого числа ССИ к КА на ГСО наиболее естественно использовать метод с временным разделением. Управление интервалами

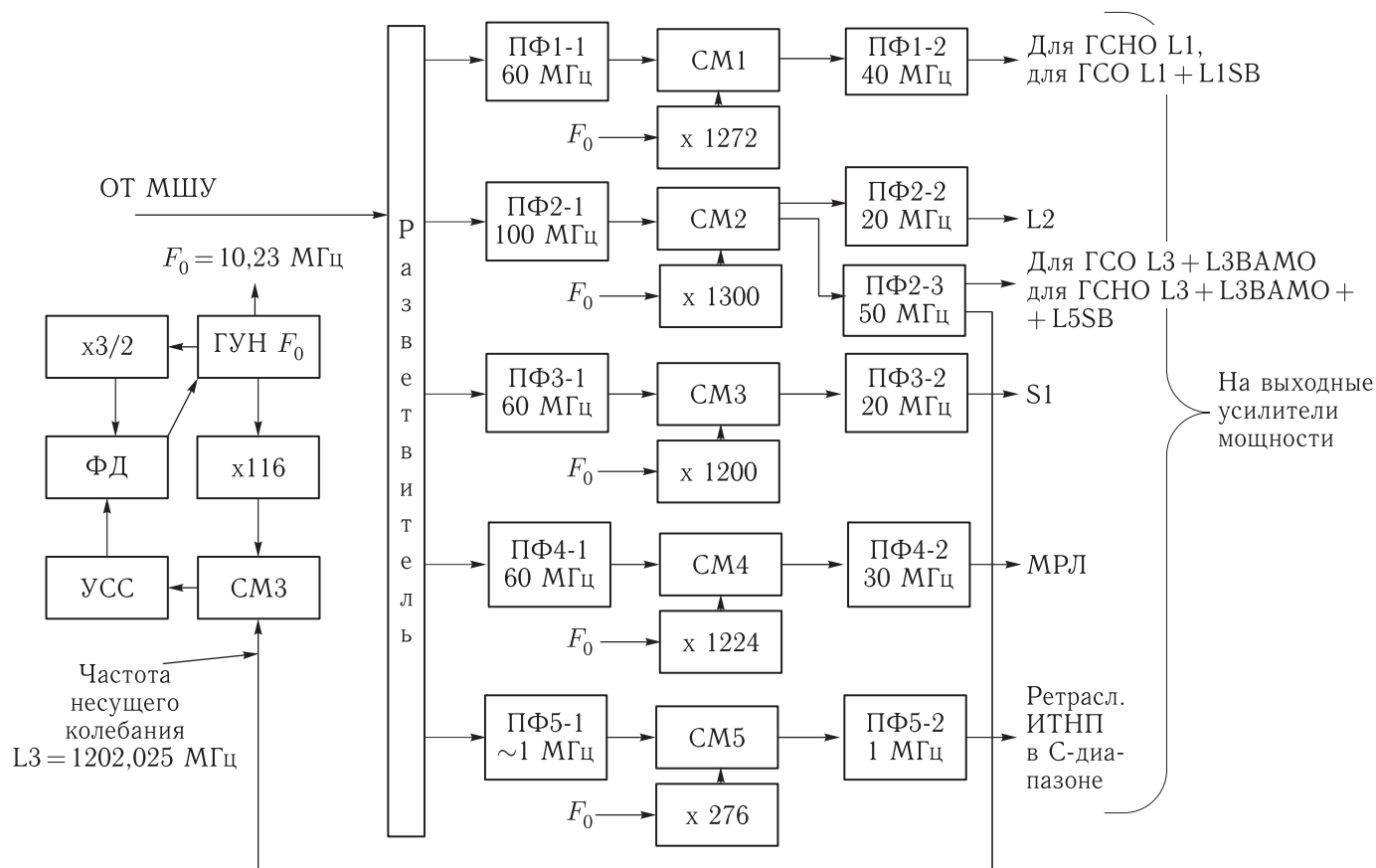


Рис. 6. РНИСС. Структурная схема бортового ретранслятора КА РНИСС

времени, предоставляемыми каждой ССИ для ретрансляции измерений через КА на ГСО, может осуществляться навигационными приемниками, расположенными на станциях наземной сети, формирующими синхронные сигналы на этих станциях.

Принципы построения бортовой аппаратуры КА РНИСС, осуществляющей когерентную ретрансляцию сигналов ЗС

В этом варианте построения бортовой аппаратуры КА РНИСС навигационные радиосигналы (НРС) и радиосигналы ФД (РФД) формируются полностью на ЗС, передаются на КА РНИСС в Ки-диапазоне и ретранслируются в диапазонах частот, указанных в табл. 3. Полная полоса частот НРС и РФД, представленная в этой таблице, составляет более 1300 МГц. С целью уменьшения

требуемой полосы частот в Ки-диапазоне ее предлагается разбить на 4 поддиапазона с соответствующими полосами частот:

- 1-й (L2, L3, L5) — 100 МГц;
- 2-й (L1, L1SBAS) — 40 МГц;
- 3-й (S МРЛ) — 30 МГц;
- 4-й (S1) — 20 МГц.

В дополнение к 4 вышеуказанным поддиапазонам необходимо добавить поддиапазон шириной ~1 МГц передачи вверх (6425–6450 МГц) дополнительной информации, осуществляемой станциями наземной сети беззапросных измерений. В результате ретранслятор должен иметь 5 стволов с соответствующими полосами пропускания.

На рис. 6 приведена структурная схема аппаратуры ретрансляции (без УМ и АФУ) для КА ГСО и ГСНО.

Полосы пропускания фильтров перед смесителями определены как минимально реализуемые

Таблица 3. Значения несущих частот БА РНИСС, осуществляющей когерентную ретрансляцию сигналов ЗС

Диапазон	Частота «вверх», МГц	Частота «вниз», МГц
L1	14 613,555	1600,995
L1SBAS	14 587,98	1575,42
L2	14 547,06	1248,06
L3	14 501,025	1202,025
L3BAMO	14 501,025	1202,025
L5SBAS	14 475,45	1176,45
S	14 767,005	2491,005
S МРЛ	14 733,77	2212,25
Ретрансляция ИТНП в С-диапазоне	6425–6450	3600–3623

на частотах 14 400–14 800 МГц. Полосы пропускания фильтров после смесителей определены исходя из ширины спектра сигнала.

Во всех схемах предусмотрена возможность синхронизации опорного генератора частоты $F_0 = 10,23$ МГц от сигнала L3. Восстановление несущей частоты для работы ФАПЧ происходит в устройстве свертки сигнала (УСС), которое по сути является корреляционным приемником. Сигналы гетеродинов для частотного преобразования формируются из опорного сигнала частоты F_0 .

Значения несущих частот радиосигналов, излучаемых «вниз» и «вверх» (диапазон Ku) для бортовой аппаратуры КА РНИСС, осуществляющей когерентную ретрансляцию сигналов ЗС, приведены в табл. 3.

Принципы построения бортовой аппаратуры КА РНИСС, осуществляющей формирование навигационных сигналов, когерентных с принимаемыми сигналами ЗС

Для сокращения количества выходных усилителей мощности и числа излучающих антенн близкие по несущей частоте сигналы L1–L1SBAS

и L3–L3BAMO–L5SBAS нелинейно уплотняются с целью выравнивания амплитуды их суммы. Это позволяет поставить выходные усилители мощности сигналов, уплотненных таким образом, в режим насыщения, что приводит к значительному повышению КПД усилителей и, как следствие, снижению потребной мощности источников питания. Однако нелинейное уплотнение искажает уплотняемые сигналы, что приводит к потерям порядка 15–16 % при выделении в приемном устройстве отдельных сигналов из нелинейно уплотненной суммы.

Структурная схема бортового формирователя навигационных радиосигналов с синхронизацией от ЗС и ретранслятора сигналов доставки в диапазоне С (6425–6450 МГц) в центр обработки беззапросных измерений, осуществляемых сетью наземных ССИ, показана на рис. 7.

Значения несущих частот радиосигналов РНИСС, излучаемых «вверх» и «вниз» для бортовой аппаратуры КА РНИСС, осуществляющей формирование навигационных сигналов, когерентных с принимаемыми сигналами ЗС, представлены в табл. 4.

С борта КА РНИСС навигационные сигналы должны излучаться в шкале времени и с цифровой информацией, принимаемой от ЗС. Для этого ЗС передает на КА («вверх») высокостабильный радиосигнал, фаза которого переносит на борт КА РНИСС наземную ШВ и цифровую информацию (навигационную и корректирующую). Радиолиния ЗС–КА реализуется в Ku-диапазоне (12,5–18 ГГц, за исключением сигнала передачи беззапросных измерений). Радиосигнал содержит две квадратуры: пилотную и данных. Для передачи на борт КА РНИСС наземной шкалы времени обе квадратуры модулируются псевдослучайной последовательностью (ПСП) с тактовой частотой 40,92 или 20,46 МГц, кратной опорной частоте 10,23 МГц, и периодом 1 с. Начало периодов модулирующих ПСП привязывается к секундным моментам наземной ШВ. Пилотная квадратура модулируется только детерминированным сигналом ПСП.

Сигнал квадратуры данных дополнительно модулируется импульсами цифровой информации (ЦИ), необходимой для формирования навигационных сообщений всех навигационных сигналов

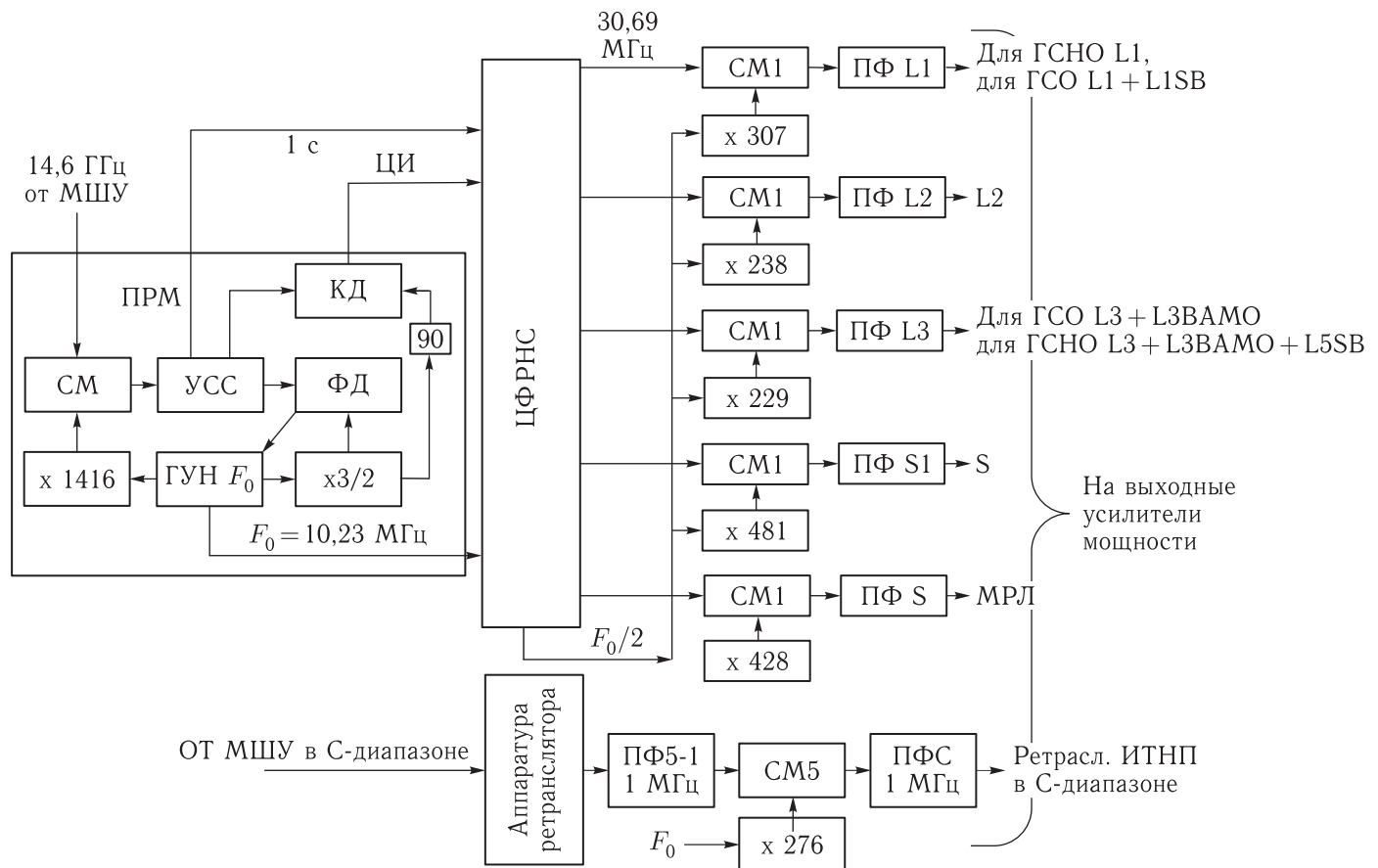


Рис. 7. Структурная схема бортового формирователя навигационных радиосигналов с синхронизацией от ЗС

Таблица 4. Значения несущих частот БА РНИСС при формировании навигационных сигналов, когерентных с принимаемыми сигналами ЗС

Сигналы		Частота «вверх», МГц	Частота «вниз», МГц
Навигационные сигналы и сигналы передачи корректирующих поправок	L1 для КА на ГСНО	14 613,555	1600,995
	L1 + L1SBAS для КА на ГСО	14 613,555	1600,995
	L2	14 547,06	1248,06
	L3 + L3ВАО + L5SBAS для КА на ГСНО	14 495,91	1202,025
	L3 для ГСО	14 501,025	1202,025
	S	14 767,0055	2491,005
S МРЛ		14 733,77	2212,25
Сигнал ретрансляции ИТНП в С-диапазоне		6425–6450	3600–3623

и сигналов КА РНИСС, передающих корректирующую информацию. В составе данных навигационных сообщений содержатся оцифровки секундных меток наземной шкалы времени.

Пилотная квадратура сигнала «вверх» используется для воссоздания на борту КА РНИСС наземной шкалы, задержанной на время распространения сигнала от ЗС до КА РНИСС. Эта шкала

задается фазой сигнала бортового опорного кварцевого генератора (ОКГ) на номинальной частоте $F_0 = 10,23$ МГц, синхронизируемого (ГУН F_0) в петле ФАП сигналом принимаемой пилотной квадратуры. Помимо этого, в бортовом приемнике (ПРМ) из пилотной квадратуры выделяется сигнал тактовой частоты ПСП и секундные импульсы наземной шкалы. В когерентном детекторе приемника из квадратуры данных выделяется цифровая информация.

Несущие сигналы, сигналы тактовой частоты ПСП, секундные импульсы, а также символы ЦИ в излучаемых КА РНИСС сигналах синхронизируются сигналом ОКГ и секундными импульсами, выделяемыми в начале каждого периода принимаемой ПСП пилотной компоненты. В результате фазы модулирующих навигационных сигналов, излучаемых КА РНИСС, несет информацию о времени по бортовой шкале КА РНИСС, которая является наземной шкалой, задержанной на время распространения сигнала.

По предварительной оценке энергопотенциал радиолинии «вверх» должен быть не менее 50 дБ Гц. Это обеспечит формирование «чистого» опорного сигнала и передачу информации «вверх» со скоростью до 10 кбит/с. Для повышения помехозащищенности радиолинии его целесообразно увеличить до 70–80 дБ Гц. По материалам [9] антенны на ГСО и ГСНО с региональным лучом будут иметь усиление больше 22 дБ Гц. Если ЗС оснастить антенной с усилением 45 дБ Гц (например, зеркало диаметром около 1 м), то при мощности наземного передатчика 100 Вт такой энергопотенциал можно обеспечить с запасом.

КА на ГСО и ГСНО имеют очень небольшую динамику. Поэтому полосы поиска и слежения в бортовой петле ФАП могут быть достаточно узкими. Относительная полоса поиска по частоте, определяемая старением кварцевого генератора, составит не более 10^{-6} , а полоса слежения при радиальной скорости 200 м/с КА относительно ЗС будет меньше 10^{-6} . Петлевые полосы ФАПЧ, определяемые радиальным ускорением, также могут быть сделаны узкими, хотя при энергопотенциале больше 50 дБ Гц в этом нет необходимости. Погрешность синхронизации по тактовой частоте ПСП при предлагаемых параметрах радиолинии,

наличии калибровки задержек в цифровом формирователе навигационных радиосигналов с помощью широкополосного измерителя задержек, входящего в состав бортового радиокомплекса, и малой динамике КА на ГСО и ГСНО может быть получена не хуже 0,2 нс.

По предварительной оценке сигнал ретрансляции через КА на ГСО со скоростью ~ 500 кбит/с в диапазоне С («вверх» — 6425–6450 МГц, «вниз» — 3600–3623 МГц) в центр обработки беззапросных измерений сети наземных ССИ будет иметь следующие характеристики: модуляция QPSK, ширина спектра сигнала 1 МГц, полоса пропускания ствола ретранслятора 1,5 МГц, спектральная плотность шума приемника — 204 дБВт/Гц, отношение сигнал/шум в полосе ретранслятора 13 дБ (задается), мощность сигнала на входе приемника — 123 дБВт, коэффициент усиления бортовой антенны 16 дБ, потери на распространение (42 тыс. км) — 190 дБ, ЭИИМ (РхГ) наземного передатчика 51 дБВт.

На основе выделенных опорных сигналов цифровой формирователь навигационных радиосигналов (ЦФНРС, рис. 8) генерирует все навигационные и информационные сигналы. Все сигналы, в том числе и сигнал МРЛ, формируются на выходе ЦФНРС на промежуточной частоте $3F_0 = 30,69$ МГц. Цифровое формирование сигналов с частотой дискретизации 122,76 МГц ($12F_0$) и разрядностью 32 обеспечивает высокую точность и стабильность генерируемых радиосигналов и возможность управления задержкой с дискретностью до 0,1 нс.

Предлагаемый метод синхронизации хорошо сопрягается с аппаратурой цифрового формирования навигационных радиосигналов (НРС). Особенно перспективным здесь является возможность программного управления задержкой дальномерных последовательностей относительно опорной, передаваемой от ЗС.

По основным критериям оценки ГНСС — качеству НРС и устойчивости к организованным помехам — предлагаемый способ формирования НРС обладает хорошими показателями. Действительно, помехоустойчивость радиоканала синхронизации с широкополосной ПСП и узкополосной системой синхронизации потенциально является высокой.

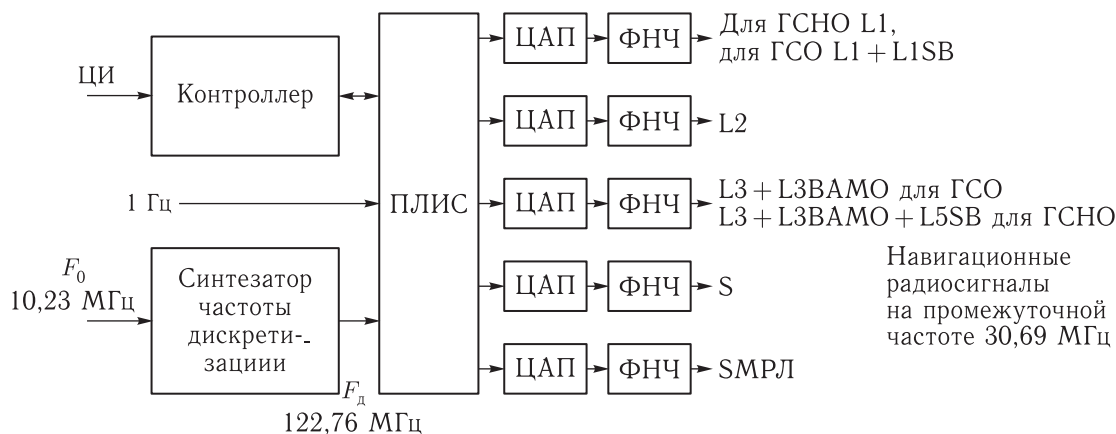


Рис. 8. Функциональная схема ЦФНРС

По предварительным оценкам, мощность бортовых передатчиков для излучения навигационных сигналов ГЛОНАСС в диапазонах L1, L2 составит 150 Вт, в диапазоне L3 с учетом передачи навигационного сигнала и сигнала передачи корректирующих поправок L3ВАМО — 325 Вт, сигнала L1SBAS — 60 Вт и сигнала L5 — 120 Вт.

Особенности решения навигационных задач в аппаратуре потребителей навигационных сигналов РНИСС

В ГНСС ГЛОНАСС, GPS, Galileo, BeiDou бортовые шкалы времени, к которым привязываются излучаемые навигационные сигналы, после внесения поправок являются синхронными с наземной шкалой системы.

В РНИСС бортовые шкалы времени формируются из фазы сигнала, переносящего наземную системную шкалу на борт КА. В результате бортовые шкалы времени КА РНИСС являются задержанными на время распространения сигналов от ЗС на КА шкалами времени системы. Таким образом, фаза сигналов РНИСС, принимаемых потребителем, равна показаниям часов системы в моменты времени, предшествующие текущему моменту приема на время распространения сигнала от ЗС до КА и от КА до потребителя. В результате в аппаратуре потребителей сигналов РНИСС

будут формироваться измерения, которые условно можно назвать двойными псевдодальностями. Эти измерения несут в себе информацию о сумме расстояний от ЗС до КА и от КА до потребителя. Учитывая эту особенность, можно построить математические модели измерений двойных псевдодальностей, двойных псевдодоплеровских смещений частот несущих колебаний сигналов КА РНИСС и двойных псевдофаз, которые будут являться основой вторичной обработки указанных измерений. Однако построение таких моделей и их использование при вторичной обработке не может быть размещено в рамках ограниченного объема данной статьи и будет рассмотрено в дальнейших публикациях авторов.

Выводы

Рассмотрены принципы построения РНИСС, устраняющей проблемы в дальнейшем развитии системы ГЛОНАСС. В РНИСС появляются новые функции: комбинирование навигации и передачи информации, комбинирование абсолютной, дифференциальной и высокоточной навигации.

РНИСС существенно отличается по принципам функционирования от существующих ГНСС. В ГНСС используются узкоцелевые КА, а в РНИСС, в отличие от ГНСС, где навигационная информация формируется на борту КА на основе заложенных с Земли данных, навигационная информация в реальном времени формируется и загружается

с Земли и затем излучается в удобном потребителю диапазоне частот. Формирование навигационных сигналов и навигационных сообщений в наземных условиях является значительно более простым и надежным по сравнению с технологией формирования на борту КА. При этом наземный комплекс может на основе анализа различных отклонений в реальном времени исправлять и вносить поправки в навигационные сообщения, повышая тем самым точность и надежность координатно-временного обеспечения.

Список литературы

1. Quasi-Zenith Satellite System Navigation Service. Interface Specification for QZSS (IS-QZSS). V1.6. Japan Aerospace Exploration Agency, November 28, 2014, 248 p.
2. BeiDou Navigation Satellite System. Signal In Space. Interface Control Document. Open Service Signals B1C and B2a (Test Version). China Satellite Navigation Office, August 2017, 103 p.
3. Колачевский Н. Н., Хабарова К. Ю., Заливако И. В. и др. Перспективные квантово-оптические технологии для задач спутниковой навигации // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018, т. 5, вып. 1. С. 13–27.
4. Vogt S., Häfner S., Grotti J., Koller S., Al-Masoudi A., Sterr U., Lisdat C. A transportable optical lattice clock // Journal of Physics: Conference Series, 2016, № 723. P. 012020.
5. Cao J., Zhang P., Shang J., Cui K., Yuan J., Chao S., Huang X. A transportable 40Ca^+ single-ion clock with $7,7 \times 10^{-17}$ systematic uncertainty // arXiv preprint, 2016, arXiv:1607.03731.
6. Inmarsat в России. <http://inmarsat-russia.ru> (дата обращения: 14.09.2018).
7. Draft IWG SBAS L5 DFMC Interface Control Document (SBAS L5 DFMC ICD). Date of issue 13.04.2015.
8. Крылов А., Локшин Б. О спутниковом вещании с высокоэллиптических орбит // Broadcasting. Телевидение и радиовещание, 2009, № 2. <http://broadcasting.ru> (дата обращения: 14.09.2018).
9. Бартенева В. А., Болотов Г. В., Быков В. Л. и др. Спутниковая связь и вещание: Справочник. 3-е изд., перераб. и доп. / Под ред. Л. Я. Кантора. М.: Радио и связь, 1997. 528 с.