

УДК 621.396.98 EDN SFELUX

Сравнительный анализ принципов формирования и измерения характеристик навигационных радиосигналов трех модификаций аппаратуры БИНК

Р. В. Бакитко, *к.т.н., otdelenie_74@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Д. А. Астахов, *otdelenie_74@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Кунин, *otdelenie_74@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. Е. Скритник, *otdelenie_74@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассматриваются три функциональные схемы формирования навигационных радиосигналов (НРС) системы ГЛОНАСС, разработанные в разные годы для разных модификаций НКА. Анализируются их особенности и влияние на основные параметры НРС. Делается акцент на особенности последнего формирователя, в котором используется цифровой метод формирования НРС. Результаты автономных испытаний цифрового формирователя ожидаются в середине 2024 г. Обсуждаются нетривиальные методы контроля параметров НРС. Отмечается отсутствие на Земле средств контроля параметров НРС при летных испытаниях.

Ключевые слова: навигационный космический аппарат (НКА), бортовой информационно- навигационный комплекс (БИНК), навигационный радиосигнал (НРС), формирователь навигационного радиосигнала (ФНРС), радиосигналы с частотным и кодовым разделением, задержки НРС, синтезаторы частот

Comparative Analysis of the Principles to Form and Measure the Characteristics of Navigation Radio Signals of Three Modifications of the OINC Equipment

R. V. Bakitko, *Cand. Sci. (Engineering), otdelenie_74@spacecorp.ru*

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

D. A. Astakhov, *otdelenie_74@spacecorp.ru*

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

A. A. Kunin, *otdelenie_74@spacecorp.ru*

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

A. E. Skrytnik, *otdelenie_74@spacecorp.ru*

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

Abstract. The paper considers three functional schemes of navigation radio signals (NRS) formation for the GLONASS system developed in different years for different modifications of navigation spacecraft (NSC). Their features and influence on the basic parameters of NRS are analyzed. Emphasis is placed on the features of the latest shaper, which uses a digital method of NRS formation. The results of autonomous tests of the digital shaper are expected in the middle of 2024. Non-trivial methods to control of NRS parameters are discussed. It is noted that there are no means of controlling NRS parameters during flight tests on Earth.

Keywords: navigation spacecraft (NSC), onboard information and navigation complex (OINC), navigation radio signal (NRS), navigation radio signal shaper (NRSS), frequency and code-division radio signals, NRS delays, frequency synthesizers

Введение

После введения в 2008 г. в систему ГЛОНАСС навигационных радиосигналов (НРС) с кодовым разделением были разработаны 3 модификации бортовой аппаратуры информационно-навигационного комплекса (БИНК).

В первой модификации БИНК-К2, разработанной в 2009 г. для НКА модификации «К2», реализовывались старые НРС с частотным разделением L1F и L2F и все новые НРС с кодовым разделением L1C, L2C и L3C. Аппаратура БИНК-К2 была построена на принципах (см. ниже), аналогичных аппаратуре БИНС НКА модификации «М», но на ЭКБ ИП категории spase.

Во второй модификации БИНК-М, разработанной в 2010 г. для НКА модификации «К», реализовывались старые НРС с частотным разделением L1F и L2F и только два новых НРС с кодовым разделением L2C и L3C. Для реализации НРС L1C мощность бортового источника питания НКА оказалась недостаточна. Аппаратура БИНК-М была построена на тех же принципах (см. ниже), что и БИНК-К2, но с некоторыми отличиями вследствие унификации блоков формирования НРС.

В третьей модификации БИНК-К2-М, разработка которой в настоящее время завершается, реализуются так же, как в БИНК-К2, все НРС с частотным и кодовым разделением. Аппаратура БИНК-К2-М построена на существенно другом принципе (см. ниже) и преимущественно на ЭКБ отечественного производства (ЭКБ ОП). Этот принцип построения в какой-то мере похож на принцип построения аппаратуры Galileo. Однако есть существенные отличия, являющиеся следствием одновременного формирования НРС с частотным и кодовым разделением, значительно усложняющие задачу. Кроме того, ключевая ЭКБ ОП (ПЛИС, модулятор и др.), существующая на этапе разработки, имеет худшие, по сравнению с ИП, параметрами, что не позволяет получить характеристики, как в Galileo. Детали принципа построения, существенно влияющие на тонкие характеристики НРС, в литературе не публиковались (как это сделано по Galileo) и широкой общественностью не обсуждались. Представляемая статья имеет целью частично устранить это упущение.

В космической группировке ГЛОНАСС планируется два НКА «К2» (один уже запущен), десять НКА «К» (функционируют четыре) и тринадцать НКА «К-2М».

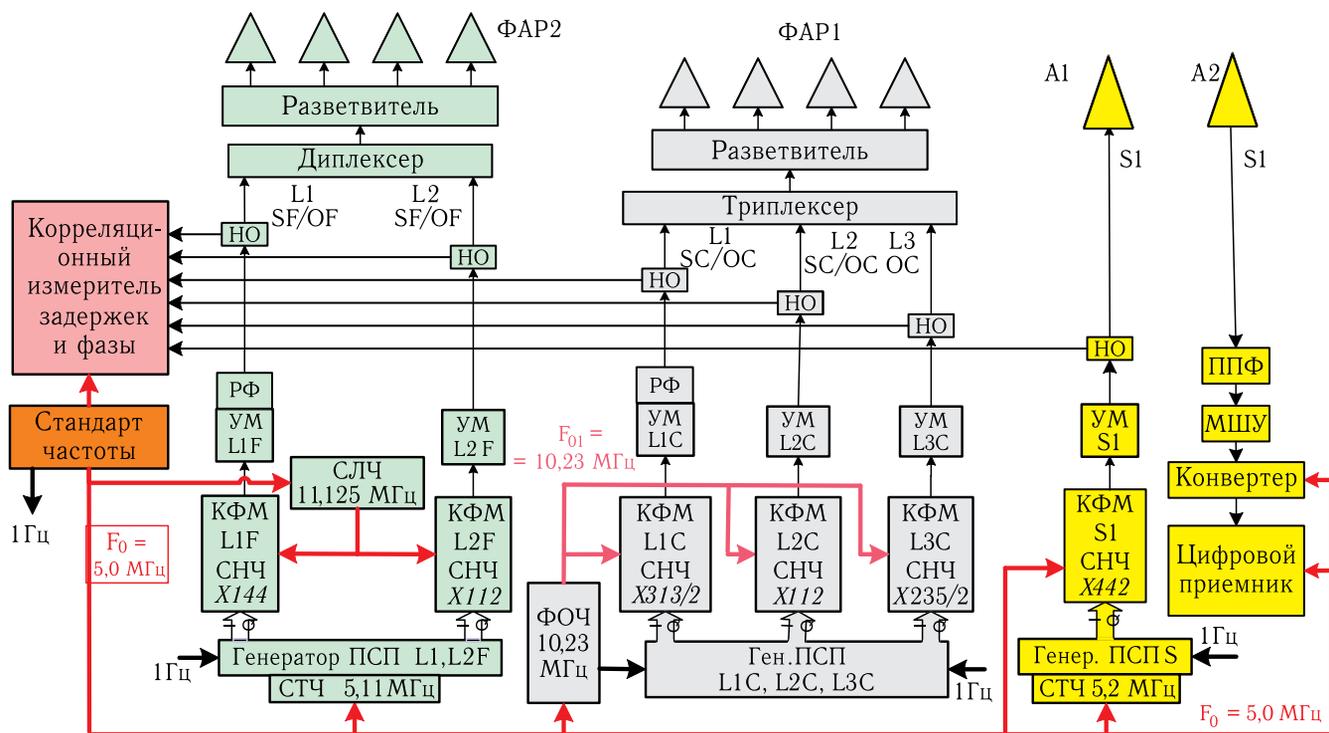
Аппаратура потребителей будет работать со всеми модификациями, каждая из которых соответствует ИКД на НРС. Однако при решении задачи объединения решений по НРС с частотным и кодовым разделением возникнет необходимость учета принципа их формирования. Не все детали принципов формирования в ИКД отражены. Поэтому в статье эти, на наш взгляд, существенные детали обсуждаются.

Далее рассматриваются три функциональные схемы аппаратуры формирования НРС с акцентом на узлах, определяющих их временные параметры. В схемах для полноты картины приведены и элементы аппаратуры межспутниковой радиолинии (МРЛ) ГЛОНАСС (выделены желтым цветом). Однако в данной работе МРЛ не обсуждается.

Аппаратура БИНК-К2

В БИНК-К2 (рис. 1) формируется весь набор НРС в соответствии с концепцией от 2011 г., кроме НРС L1C/AP.

НРС с частотным разделением (элементы формирования выделены зеленым цветом) характеризуются отсутствием целочисленной кратности несущей частоты и тактовой частоты ПСП. Поэтому при их формировании используются разные синтезаторы частот. Синтезатор литерных несущих частот (СЛЧ) общий для диапазонов L1 и L2 выдает опорный сигнал литерной частоты 11,125 МГц $\pm\Delta$. Этим обеспечивается хорошая когерентность несущих частот двух диапазонов. Синтезатор тактовых частот (СТЧ), также общий для формирования одинаковых ПСП-диапазонов L1 и L2, выдает тактирующий ПСП-сигнал, жестко привязанный к секундному импульсу 1 Гц. Этим обеспечивается минимизация задержек между диапазонами и их взаимная нестабильность. Оба синтезатора работают от общего эталонного генератора частоты 5,0 МГц. В НРС с частотным разделением невозможно обеспечить синхронизацию фазы кода и фазы несущей частот, так как несущие и тактовые частоты ПСП не кратны.



ФОЧ – формирователь опорной частоты F_{01} СЧЧ – синтезатор несущей частоты НО – направленный ответвитель
 КФМ – квадратурный фазовый модулятор СЛЧ – синтезатор литерной частоты ПФ – полосовой фильтр
 СТЧ – синтезатор тактовой частоты РФ – режекторный фильтр

Рис. 1. Функциональная схема аппаратуры БИНК-К2

Напротив, НРС с кодовым разделением характеризуются целочисленной кратностью частот несущей и тактовой ПСП (элементы формирования выделены голубым цветом). Несущие и тактовые частоты формируемых НРС кратны опорной частоте 10,23/2 МГц. Это обеспечивает хорошую когерентность несущих частот и синфазность несущих и тактовых частот. Вследствие кратности несущие частоты и тактовые частоты ПСП формируются из одной опорной частоты 10,23 МГц. Формирователь опорной частоты (ФОЧ) построен на основе прецизионного термостатированного кварцевого генератора, синхронизированного с сигналом эталонного генератора 5,0 МГц. Фаза опорного сигнала 10,23 МГц совпадает с фазой эталонного генератора 5,0 МГц каждые 100 микросекунд с отклонением не более) 0,1 градуса.

При таком методе формирования НРС с кодовым разделением сдвигаются относительно НРС с частотным разделением на некоторую постоянную величину.

Двухкомпонентные радиосигналы всех НРС образуются в квадратурном фазовом модуляторе (КФМ), на который поступают радиосигналы на соответствующих несущих частотах и модулирующие видеосигналы ПСП с цифровой информацией.

НРС с частотным и кодовым разделением излучаются через разные антенны, так как при суммировании для излучения через общую антенну возникают потери мощности около 3 дБ. НРС с кодовым разделением излучаются ФАР1, установленной на вертикальной оси НКА. НРС с частотным разделением излучаются ФАР2, установленной на расстоянии 1 м от ФАР1. В результате между НРС с частотным и кодовым разделениями появляется дополнительный переменный временной сдвиг в пределах $\pm 3 \text{ нс}$ в зависимости от угла β между направлением на приемник и линией, соединяющей фазовые центры антенн.

В итоге между НРС с частотным и кодовым разделениями имеется постоянный временной

Таблица

п/п	Параметр	Измеренное значение
1	Случайные отклонения задержки дальномерного кода (σ) за 100 с, нс:	
	— сигнал L1OF, — сигнал L1OC	0,02 0,05
2	Смещение между ПСП ортогональных сигналов, не более, нс:	
	— сигналы L1OF–L1SF, — сигналы L1OC–L1SC	0,13 0,12
3	Сдвиг фазы между ортогональными компонентами радиосигналов, град:	
	— сигналы L1OF–L1SF, — сигналы L1OC–L1SC	$90 \pm 0,2$ $90 \pm 0,2$

сдвиг, возникающий при формировании от разных опорных сигналов и переменный временной сдвиг, зависящий от угла β . Указанное обстоятельство должно учитываться при решении навигационной задачи в НАП.

При наземных испытаниях временные и спектральные характеристики НРС измеряются с помощью многоканального корреляционного приемника (МКИП) — измерителя задержек ПСП и фазы несущей частоты (выделен коричневым цветом). Измерения задержки каждого НРС производятся относительно внутренней шкалы МКИП, сформированной на основе сигналов эталонного генератора, общего с бортовым комплексом БИНК-К2 (выделен розовым цветом). Разрешающая способность МКИП по задержкам не хуже 30 пс и по фазе не хуже 3 градусов. Примеры результатов измерений некоторых параметров при испытаниях БИНК-К2 № 13 приведены в итоговой таблице.

Аппаратура БИНК-М2

В БИНК-М2 (рис. 2) формируется сокращенный относительно концепции набор НРС вследствие энергомассовых ограничений НКА типа «К».

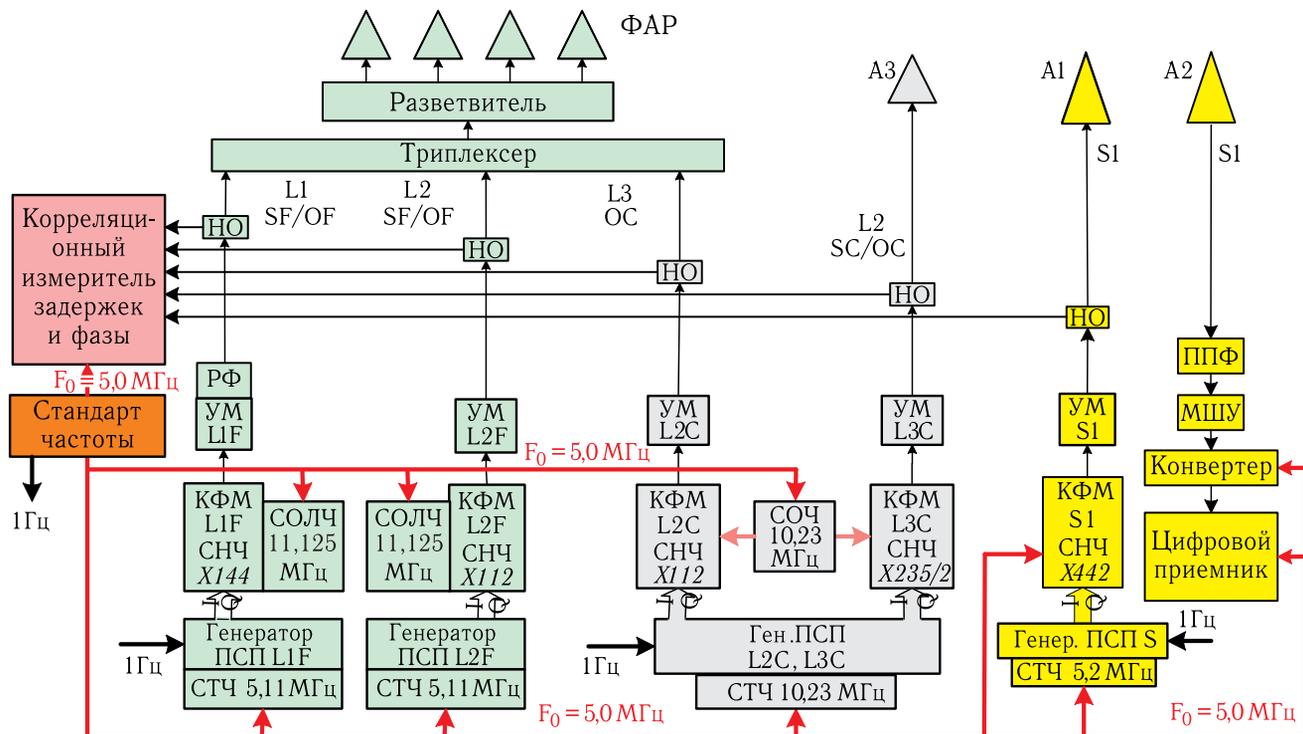
Два НРС с частотным разделением L1F и L2F формируются независимо каждый от своего син-

тезатора литерной частоты и синтезатора тактовой частоты. Так сделано с целью унификации блоков формирования НРС и уменьшения трудоемкости при изготовлении. Однако следствием такого решения является ухудшение относительной стабильности шкал времени НРС L1F и L2F.

Два НРС с кодовым разделением L2C и L3C формируются с использованием общих синтезаторов литерной и тактовой частот для обеспечения хорошей когерентности несущих частот и стабилизации междиапазонной задержки ПСП, следовательно, лучшей относительной стабильности шкал времени НРС L2C и L3C.

Двухкомпонентные радиосигналы всех НРС БИНК-М2 образуются аналогично БИНК-К2 в квадратурном фазовом модуляторе КФМ.

На НКА «Глонасс-К» размещается только одна ФАР по оси изделия, через которую излучаются два НРС с частотным разделением L1F и L2F и один НРС с кодовым разделением L3C. Второй НРС L2C с кодовым разделением излучается отдельной антенной, установленной на расстоянии около 1 м от ФАР. Так сделано, потому что при излучении через общую антенну НРС L2C и L2F возникают потери мощности около 3 дБ. Естественно, между тремя НРС L1F, L2F, L3C и НРС L2C, излучаемыми разными антенными системами,



ФОЧ – формирователь опорной частоты F_{01} СНЧ – синтезатор несущей частоты НО – направленный ответвитель
 КФМ – квадратурный фазовый модулятор СЛЧ – синтезатор литерной частоты ПФ – полосовой фильтр
 СТЧ – синтезатор тактовой частоты РФ – режекторный фильтр

Рис. 2. Функциональная схема аппаратуры БИНК-М2

существует переменный в зависимости от направления на приемник сдвиг по времени в пределах ± 3 нс.

Аппаратура БИНК-К2-М

В БИНК-К2-М (рис. 3) формируется весь набор НРС в соответствии с концепцией (как в БИНК-К2).

Принципиально новых решений в БИНК-К2-М относительно БИНК-К2 три:

- для излучения всех НРС используется одна ФАР;
- формирование НРС производится цифровым методом на промежуточной частоте с последующим аналоговым преобразованием на выходную частоту;
- в состав БИНК-К2-М введен измеритель задержек дальномерных ПСП.

С целью излучения всех НРС через единую ФАР НРС с перекрывающимися полосами частот в каждом из диапазонов L1 и L2 объединяются в один групповой навигационный радиосигнал (ГНРС). Предварительная оценка потери мощности вследствие такого объединения составила не более 13%, что требует экспериментального подтверждения.

Эквивалентная схема формирователя ГНРС в диапазоне L1 приведена на рис. 4.

Групповой НРС формируется суммированием с весовым коэффициентом $K \sim 1,4$ некогерентных цифровых радиосигналов L1C (кодовый) и L1F (частотный). Суммарный цифровой радиосигнал имеет эквивалентную амплитудную модуляцию (АМ) глубиной около 70%. Для эффективного усиления мощности в твердотельных усилителях мощности над суммарным сигналом производится нелинейное преобразование, уменьшающее глубину АМ до 5% (выравнивание). Уменьшение глубины АМ осуществляется цифровым методом путем деления

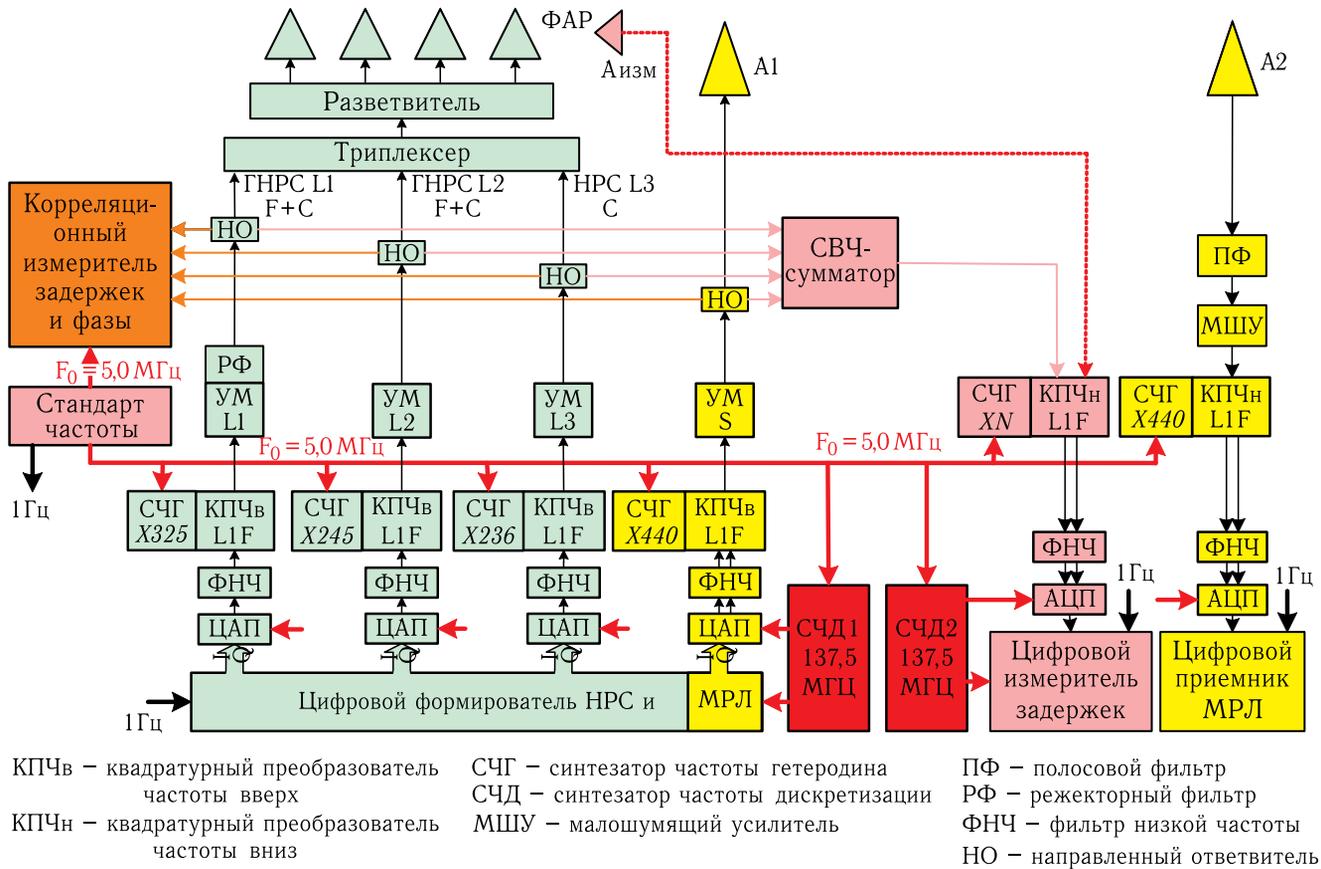


Рис. 3. Функциональная схема аппаратуры БИНК-К2-М

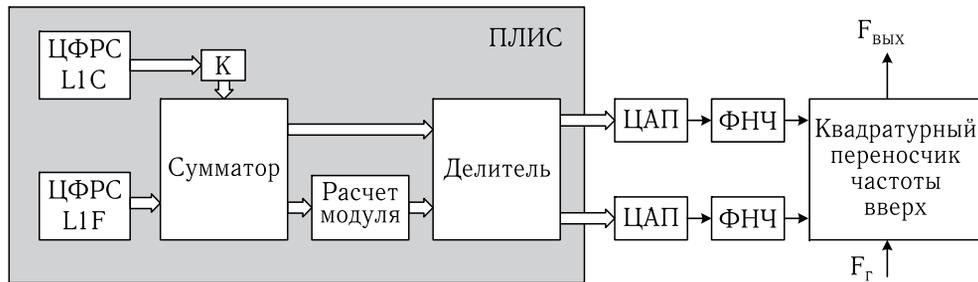


Рис. 4. Эквивалентная схема формирователя одного ГНРС

мгновенных значений комплексных компонент суммы радиосигналов на модуль суммы(X):

$$I(t) = x(t)/\sqrt{x^2(t) + y^2(t)},$$

$$Q(t) = y(t)/\sqrt{x^2(t) + y^2(t)}.$$

Точное значение коэффициента К экспериментально устанавливается таким, чтобы отношение мощностей НРС L1C и L1F после выравнивания составляло 2:1.

Цифровой радиосигнал формируется в ПЛИС на промежуточной частоте (ПЧ) в диапазоне 0–40 МГц. Далее в ЦАП он преобразуется в аналоговую форму и проходит через фильтр низких частот (ФНЧ) 2-го порядка с частотой среза 40 МГц. После фильтрации осуществляется перенос сформированного на ПЧ радиосигнала на рабочие частоты каждого из диапазонов с подавлением зеркального канала не менее чем на 40 дБ. Для обеспечения такого подавления требуется точная подстройка квадратурных компонент преобразуемого

радиосигнала по постоянному смещению, амплитуде и фазе в широкой полосе частот.

В БИНК-К2-М используются два одинаковых синтезатора частоты дискретизации $F_d = 137,5$ МГц (выделено красным цветом). Первый синтезатор частоты дискретизации используется для цифрового формирования НРС на ПЧ. Второй аналогичный синтезатор используется для измерения задержек, сформированных НРС, и для приема радиосигнала МРЛ. Такое решение вызвано конструктивными соображениями и тенденция унификации.

В состав БИНК-К2-М введен корреляционный измеритель задержек формируемых радиосигналов (выделен розовым цветом). Все формируемые радиосигналы с выходов усилителей мощности через направленные ответвители (НО) суммируются в широкополосном сумматоре и по общему калиброванному кабелю поступают на вход измерителя, который поочередно измеряет задержки в четырех диапазонах частот: L1, L2, L3 и S. Для охвата измерениями всех элементов АФУ без исключения предлагается установить дополнительную антенну около ФАР и подавать на измеритель сигнал с этой антенны.

Бортовой корреляционный измеритель имеет 6 корреляционных каналов для измерений одновременно по всем НРС каждого диапазона. Разрешающая способность измерителя 30 пс. Ожидаемая систематическая погрешность измерителя 0,1 нс. Результаты измерений задержек могут использоваться для автоматической подстройки задержек всех формируемых НРС к одному фиксированному значению и для передачи на Землю. Этот вопрос требует отдельного обсуждения. В протоколе логического и информационного взаимодействия между БИНК-К2-М и БКУ передача результатов измерений задержек в БКУ не предусмотрена.

При наземных испытаниях аппаратуры БИНК-К2-М штатное измерение основных энергетических и временных характеристик НРС производится с помощью входящего в КПА корреляционного контрольного приемо-формирующего устройства (КПФУ), являющегося развитием используемого для этих целей МКИП. КПФУ, в отличие от МКИП, обеспечивает измерение парциальных мощностей ГНРС, а также задержек всех форми-

руемых НРС относительно эталонной шкалы испытательного комплекса и фазовых флуктуаций несущих частот всех радиосигналов с повышенной точностью. Прибор КПФУ имеет следующие параметры:

- погрешность измерения парциальной мощности не хуже 0,5 дБ;
- разрешающая способность по задержке 20 пс;
- систематическая погрешность по задержке 0,1 нс;
- случайная погрешность измерения фазы несущей частоты (СКО) 0,3 град;
- систематическая погрешность измерения фазы несущей частоты 1,0 град.

Планируется аттестация КПФУ как средства измерения во ВНИИФТРИ.

Заключение

Из перечисленных трех модификаций вторая БИНК-М2 находится в эксплуатации на трех НКА. ЛКИ первой БИНК-К2 начаты в сентябре 2023 г. Запуск третьей планируется 2025 г.

За время первых месяцев работы с БИНК-М2 не было зафиксировано какого-либо отличия в сигналах с частотным разделением от БИНС НКА «М» ни в лучшую, ни в худшую стороны. Вероятно, разница существует, но разрешение средств контроля недостаточно. По работе с кодовым сигналом L2C информации пока мало. Сигнал принимают и измеряют по нему, но сравнительных количественных оценок погрешности измерения псевдодальности по нему нет. Отрицательных эффектов от одновременного излучения в общем частотном диапазоне НРС с частотным и кодовым разделением не наблюдается. Подробный анализ результатов испытаний первых двух модификаций планируется провести в начале 2024 г. Существенно новым ожидается результат трехчастотных кодовых измерений и оценка расхождений между измерениями по частотным и кодовым НРС, излучаемыми разными антеннами.

При летных испытаниях новых модификаций НКА с новыми формирователями НРС проявилось отсутствие в НКУ ГЛОНАСС штатных средств измерения временных и спектральных параметров НРС, влияющих на точность навигационных измерений. Существующие штатные средства контроля обеспечивают только измерение мощности НРС.

С началом ЛКИ третьей модификации БИНК-К2-М появится задача измерения парциальных мощностей групповых НРС. В настоящее время обсуждаются три методики:

- на основе классического корреляционного приемника;
- методом временного накопления (ВНИИР «Прогресс»);
- спектральным методом (ВНИИФТРИ).

Первые два метода работают с небольшими ненаправленными антеннами, третий метод работает на антеннах с большим усилением.

К началу ЛКИ БИНК-К2-М методику измерений парциальных мощностей ГНРС следует отработать и утвердить.

Список литературы

1. Бакитько Р. В., Дворкин В. В., Карутин С. Н., Корогодин И. В., Нагин И. А., Перов А. И., Поваляев А. А., Фаткулин Р. Ф., Шатилов А. Ю. ГЛОНАСС модернизация и перспективы развития / Под ред. А. И. Перова М.: Радиотехника, 2020. 1072 с.
2. Urlichich Yu., Subbotin V., Stupak G., Dvorkin V., Povalyayev A., Karutin A., Bakitko R. GLONASS Modernization. GPS World, November 2011.
3. Харисов В. Н., Поваляев А. А. Оптимальное выравнивание суммы навигационных сигналов в ГНСС // Радиотехника. 2011. № 7. С. 65–75; Журнал в журнале «Радиосистемы» Вып. 164. Статистический синтез радиосистем.
4. Серeda А. Ю., Детюк К. В. Бортовой информационно-навигационный комплекс КА «Глонасс-К» // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2012. № 3. С. 115–119; <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/906>
5. Бирюков А. А. Вариант технической реализации устройства нелинейного уплотнения частотных и кодовых навигационных сигналов ГЛОНАСС // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. Т. 5, № 2. С. 11–19.
6. Астахов Д. А. Модернизация структуры формирования навигационных сигналов ГЛОНАСС // Успехи современной науки. 2016. Т. 8, № 12. С. 43–46.
7. Ткачев А. Б., Астахов Д. А. Цифровое формирование навигационных сигналов системы ГЛОНАСС // Информация и космос. 2017. № 1. С. 81–83.
8. Ткачев А. Б., Астахов Д. А. Экспериментальное исследование энергетических потерь схемы формирования группового навигационного сигнала ГЛОНАСС // Информация и космос. 2019. № 3. С. 39–44.

Дата поступления рукописи
в редакцию 22.09.2023
Дата принятия рукописи
в печать 08.02.2024