

ственного оптического волокна произвольной длины. При этом время задержки распространения сигналов в оптоволоконке алгоритмически исключается из выражения для расхождения ШВ. Интервал времени, образующий мертвую зону между единичными измерениями, составляет порядка 10 мкс, что позволяет проводить многократные (с частотой до десятков кГц) сличения в течение секундного цикла. При условии достаточной прозрачности оптоволоконки, что необходимо и для других методов, это обеспечивает независимость точности синхронизации от состояния линии связи, возможность синхронизации ШВ между объектами, расположенными на значительном удалении в произвольных точках, в том числе вследствие использования темного волокна.

Таким образом, применение СОДС ШВ позволит: повысить точность синхронизации ШВ между наземными пунктами по сравнению с существующими методами в результате использования оптических сигналов, оптоэлектронных модулей, таймеров событий и генераторов с широкой полосой пропускания; обеспечить погрешность сравнения ШВ не более 100 пс; повысить надежность и оперативность сравнения ШВ вследствие применения ВОЛС; обеспечить возможность сравнения или синхронизации ШВ между объектами, расположенными на значительном удалении в произвольных точках, с одного оптического волокна произвольной длины, в том числе темного волокна, арендуемого у операторов общедоступных сетей связи.

Литература

1. Игнатенко И. Ю. и др. Формирование и передача национальной шкалы времени в ГНС ГЛОНАСС // Метрология времени и пространства: докл. 6-го Междунар. симп. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2013. С. 222—228.
2. Блинов И. Ю. и др. Калибровка канала дуплексных сравнений шкал времени TWSTFT между ФГУП «ВНИИФТРИ» и РТВ // Труды института прикладной астрономии РАН. 2013. Вып. 27. С. 102—111.
3. Piester D. e. a. Remote atomic clock synchronization via satellites and optical fibers // Adv. Radio Sci. 2011. V. 9. P. 1—7.
4. Иванов А. В. и др. Сличения территориально удаленных эталонов времени и частоты с применением волоконно-оптических линий связи // Труды института прикладной астрономии РАН. 2012. Вып. 23. С. 131—135.
5. Садовников М. А., Федотов А. А., Шаргородский В. Д. Высокоточная односторонняя лазерная дальнометрия: состояние и перспективы применения в ГЛОНАСС // Труды института прикладной астрономии РАН. 2012. Вып. 23. С. 61—69.
6. Садовников М. А., Сумерин В. В. Беззапросные квантово-оптические системы контроля и передачи шкал времени ГЛОНАСС // Вестник ГЛОНАСС. 2012. № 3(7). С. 39—42.
7. Колмогоров О. В., Прохоров Д. В. Комплекс аппаратуры контроля характеристик оптического излучения и структуры сигнала // Оптика, фотоника и опто-информатика в науке и технике: Тез. докл. науч.-практ. конф. Москва, 2013. С. 54.

Дата принятия 01.10.2014 г.

681.2.088

Обеспечение единства измерений при развитии и использовании ГЛОНАСС

О. В. ДЕНИСЕНКО, В. Н. ФЕДОТОВ, И. С. СИЛЬВЕСТРОВ,
Ф. Р. СМЕРНОВ, Н. Р. БАЖЕНОВ, Л. Б. ГЕРИЕВА

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
Менделеево, Россия, e-mail: denisenko@vniiftri.ru

Рассмотрены комплексы метрологического обеспечения для развития и использования глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС) на период до 2016 г. Предложен подход к абсолютной калибровке беззапросных средств измерений, используемых для частотно-временного обеспечения этой системы, проведен эксперимент по подтверждению его правильности.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, метрологическое обеспечение, абсолютная калибровка.

The metrological assurance complexes currently created in order to achieve the characteristics of GLONASS for the period until 2016 are considered. An approach for realization of absolute calibration of navigation equipment used for time-frequency support of GLONASS is proposed. The results of experiments to validate the correctness of the proposed approach are presented.

Key words: GLONASS, metrological assurance, measuring instruments, absolute calibration.

В федеральной целевой программе (ФЦП) [1] установлены высокие требования к погрешности определения потребителем своего местоположения в реальном времени в государственной геоцентрической системе координат при использовании космического комплекса ГЛОНАСС. Комплекс состоит из орбитальной группы навигационных космических аппаратов (НКА) и наземного комплекса управления. Задан-

ные требования к указанной погрешности обуславливают потенциальную точность, с которой потребитель принимает сигналы системы идеальным приемником, у которого отсутствуют собственные (инструментальные) погрешности измерений, а также погрешности, обусловленные средой распространения навигационных сигналов (ионосферные, тропосферные и возникающие при эффекте многолучевости).

Целевой индикатор ФЦП [1], характеризующий погрешность определения потребителем своего местоположения, к окончанию 2016 г. уменьшится более чем в два раза по сравнению с аналогичным показателем 2011 г. предыдущей программы. Повышение точности системы более чем в два раза достигается при сбалансированном развитии всех составных частей, однако особое внимание уделяется обеспечению единства измерений, проводимых в ГЛОНАСС.

В статье рассмотрены радиотехнические измерения и средства измерений (СИ) ГЛОНАСС, функционирующие в беззапросном (БИС) и запросном режимах (ЗИС), СИ НКА, такие как бортовой источник навигационного сигнала, бортовая аппаратура межспутниковых измерений, бортовое синхронизирующее устройство, навигационная аппаратура потребителей (НАП). Правомочность отнесения данных средств к СИ обусловлено действием закона [2], стандартами [3, 4], другими нормативными документами. В частности, в [4] утверждена государственная поверочная схема для координатно-временных СИ, использующих сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и их дополнений для абсолютных и (или) относительных измерений местоположения объектов и параметров, характеризующих их движение на Земле и в околоземном пространстве. В соответствии с [4] БИС принадлежат эталонам 2-го разряда, НАП — рабочим СИ.

Комплексы метрологического обеспечения ГЛОНАСС.

Обеспечению единства измерений в системе посвящен ряд работ в разделе «Развитие комплекса средств метрологического обеспечения ГЛОНАСС» ФЦП [1]. В настоящее время во ВНИИФТРИ разрабатывают комплексы метрологического обеспечения ГЛОНАСС в части радиотехнических измерений в интересах достижения тактико-технических характеристик системы на 2016 г. К ним относятся:

- стационарный и мобильный комплексы метрологического обеспечения средств оценки характеристик БИС и ЗИС наземного комплекса управления;

- стационарный комплекс метрологического обеспечения бортовых радиотехнических средств НКА;

- комплекс метрологического обеспечения НАП.

Особенности каждого из создаваемых комплексов приведены ниже.

Стационарный комплекс метрологического обеспечения средств оценки характеристик БИС и ЗИС основан на использовании высокоточного комплекта измерителя навигационных параметров по сигналам ГНСС в стационарном исполнении и квантовой оптической системы. По некоторым параметрам данный измеритель можно считать идеальным приемником. Для него по специальной методике с применением соответствующих эталонов единиц величин оценивают инструментальные погрешности измерений, учитываемые при приеме сигналов ГЛОНАСС и других навигационных систем. Систематическую составляющую погрешности измерений контролируют и оценивают при калибровке приемного устройства, антенны и антенного кабеля. Для этого используют прецизионный имитатор сигналов ГНСС и специальный эталон фазовых параметров антенн. Проведение измерений навигационных параметров по сигналам ГЛОНАСС и других ГНСС с высокоточной привязкой к национальной шкале координированного времени UTC (SU) является особенностью измерителя, позволяющей оценить расхождение указанной шкалы и шкалы ГЛОНАСС в абсолютном режиме, а расхождение шкал UTC (SU) и террито-

риально разнесенных эталонов единиц времени и частоты — в дифференциальном. Ниже приведены результаты, достигнутые во ВНИИФТРИ при создании данного измерителя.

Мобильный комплекс метрологического обеспечения средств оценки характеристик БИС базируется на использовании высокоточного измерителя в мобильном исполнении, отличительной особенностью которого является разработка указанного радиотехнического средства в соответствии с требованиями перевозки и функционирования в местах эксплуатации БИС. Необходимость создания мобильного измерителя появилась из-за существенной погрешности измерений методического характера, возникающей при оценке метрологических характеристик БИС удаленно, т. е. с использованием высокоточных орбит НКА и распространения измерений стационарного измерителя на измерения контролируемых средств. Иногда данная погрешность соизмерима с метрологическими характеристиками оцениваемых средств. Мобильный комплекс метрологического обеспечения имеет высокоточный рекордер навигационных сигналов ГНСС, позволяющий записывать сигналы системы в местах эксплуатации оцениваемых радиотехнических средств, воспроизводить их (формировать) и оценивать работу прецизионного измерителя навигационных параметров в стационарном исполнении. Специалистами ВНИИФТРИ разработан метод оценки точностных характеристик рекордеров навигационных сигналов ГНСС.

Стационарный комплекс метрологического обеспечения бортовых радиотехнических средств НКА основан на антенной системе, которая, в свою очередь, реализована на базе полноповоротного антенного устройства, имеющего зеркальную систему, построенную по схеме Кассегрена с диаметром рефлектора 12 м. Антенная система включает в свой состав облучатель совмещенного приема L и K_u -диапазонов и приемный тракт. Система обеспечивает наведение на НКА, необходимое для решения следующих задач: формирование условий для измерений канальной мощности сигналов ГЛОНАСС в частотных диапазонах L1, L2, L3, сигналов угломерного канала НКА «Глонасс-К» и сигналов зарубежных навигационных систем (GPS L1, L2, L5 и Galileo E1, E5a, E5b), а также для измерений сдвига псевдослучайных последовательностей сигналов ГЛОНАСС в диапазонах L1, L2, L3.

Высокие требования, предъявляемые к шумовой добротности (не менее 17—19 дБ/К для L-диапазонов, не менее 39,5 дБ/К для K_u -диапазона) выполняют с помощью антенной системы. В качестве устройства, принимающего сверхвысокочастотную энергию с выхода облучателя этой системы и измеряющего канальную мощность и сдвиг псевдослучайных последовательностей навигационных сигналов, используют приемно-вычислительный блок на основе многоканального цифрового регистратора. Такое построение приемного устройства даст возможность оценивать характеристики навигационных сигналов ГЛОНАСС как с открытым, так и санкционированным доступом. В настоящее время институт добился существенных результатов в измерениях мощности ортогональных составляющих сигналов ГНСС.

Комплекс метрологического обеспечения НАП базируется на использовании комплекта аппаратуры воспроизведения сигналов ГНСС с пространственно-разнесенными излучателями в безэховой экранированной камере. Такая камера размерами 19,5×13,7×8,9 м, находящаяся в институте, позволяет выполнять электромагнитные измерения в условиях, максимально приближенных к условиям свобод-

ного пространства, и гарантирует снижение уровня внешних электромагнитных помех не менее чем на 80 дБ, а коэффициента безэховости в рабочей зоне камеры — не более – 35 дБ в диапазоне частот 1–40 ГГц.

Излучатели расположены на стенах и потолке безэховой экранированной камеры. Имитатор сигналов формирует навигационные сигналы. Каждый из излучателей может испускать навигационные сигналы одного НКА ГЛОНАСС в частотных диапазонах L1, L2, L3 или одного аппарата GPS в диапазонах L1, L2. Количество излучателей позволяет сформировать навигационное поле как совокупность сигналов (применительно к антенне НАП), в настоящее время обеспечиваемое орбитальными группировками НКА ГЛОНАСС и GPS. Таким образом, комплект аппаратуры воспроизведения навигационных сигналов ГНСС с пространственно-разнесенными излучателями в безэховой экранированной камере фактически создает идеальные условия для работы НАП, так как отсутствуют погрешности измерений, обусловленные космическим сегментом и средой распространения навигационных сигналов. При таких условиях возможна оценка метрологических характеристик НАП, т. е. инструментальных погрешностей измерений.

Комплект аппаратуры (наряду с передачей навигационных сигналов ГНСС) может воспроизводить одновременно до двух сигналов помех разных типов: гармонических, широкополосных, импульсно-модулированных). Оценка метрологических характеристик НАП в условиях сложной помеховой обстановки является крайне важной для этой аппаратуры. Подобным образом можно оценить метрологические характеристики помехоустойчивой НАП с антенными решетками, компенсаторов помех и т. п.

Абсолютная калибровка БИС ГЛОНАСС. Под БИС понимают средства для измерений текущих навигационных параметров по сигналам ГЛОНАСС, используемые для работы самой системы и ее частотно-временного обеспечения [5]. Такие средства позволяют проводить измерения с высокой привязкой к внешней шкале времени, например шкале наземного измерительного пункта. Поэтому при работе используют как гармонические сигналы частоты (в основном 5 или 10 МГц), так и импульсные сигналы шкалы времени (1 PPS) от внешних эталонов единиц времени и частоты, опорных генераторов. Чтобы выполнять высокоточную привязку к внешней шкале времени, требуется калибровка БИС для оценки и дальнейшего учета собственных (инструментальных) погрешностей измерений. Данные погрешности обусловлены инструментальными временными задержками навигационного сигнала — групповым временем запаздывания (ГВЗ) при распространении в радиотехническом тракте БИС (антенна, антенный кабель, приемное устройство) и привязкой к внешней шкале времени. Для выполнения в навигационной системе условий по обеспечению погрешности определения потребителем своего местоположения необходимо соблюдать требования к калибровке БИС, т. е. остаточные погрешности измерений этих средств, обусловленные межлитерным, межчастотным ГВЗ, должны быть не более 0,15 м (0,5 нс).

В [6] рассмотрен дифференциальный метод измерений на основе эталонного безапросного средства (дифференциальная калибровка). В настоящее время во ВНИИФТРИ проводится абсолютная калибровка БИС, иначе говоря — оценка ГВЗ навигационного сигнала при распространении в радиотехническом тракте указанных измерительных средств с применением эталонов единиц величин.

Для определения ГВЗ навигационного сигнала в антенне и антенном кабеле БИС применяют специальный эталон фазовых параметров антенн на основе векторного анализатора цепей и эталонной антенны в безэховой камере, а для нахождения этого времени в приемном устройстве БИС — прецизионные имитаторы сигналов ГНСС, которые, в соответствии с [4], относятся к эталонам 1-го разряда. Для оценки ГВЗ навигационного сигнала в имитаторе сигналов ГНСС во ВНИИФТРИ используют уникальную установку — анализатор навигационных сигналов на основе многоканального цифрового осциллографа. Цель измерений — получение на экране анализатора временных диаграмм высокочастотного навигационного сигнала. Такой сигнал от имитатора подается на второй канал анализатора в режиме стробирования импульсным сигналом шкалы времени частотой 1 Гц (1 PPS), который поступает от имитатора на первый канал анализатора. Поскольку шкала времени (1 PPS) имитатора сигналов ГНСС и высокочастотный навигационный сигнал, содержащий метку этой шкалы, формируются одним и тем же внутренним опорным генератором, то по изменению фазы навигационного сигнала в определенном месте в соответствии с [7] можно оценить ГВЗ этого сигнала в имитаторе.

На приемное устройство БИС при калибровке от имитатора подается как высокочастотный навигационный сигнал, так и импульсный сигнал шкалы времени частотой 1 Гц

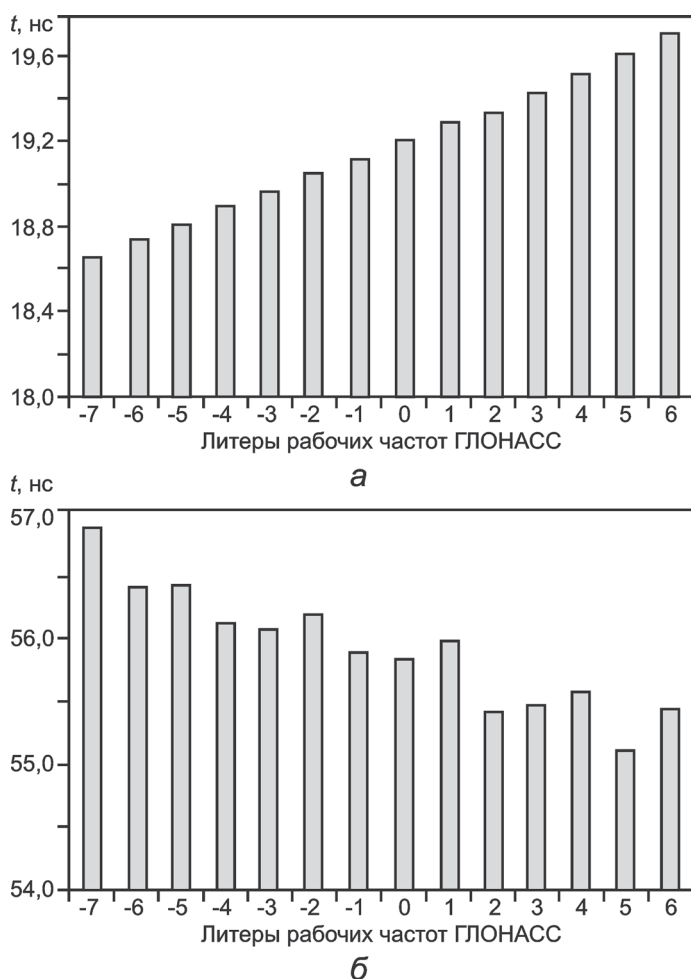


Рис. 1. Групповое время задержки антенны (а) и приемного устройства (б) при приеме сигналов ГЛОНАСС (L1)

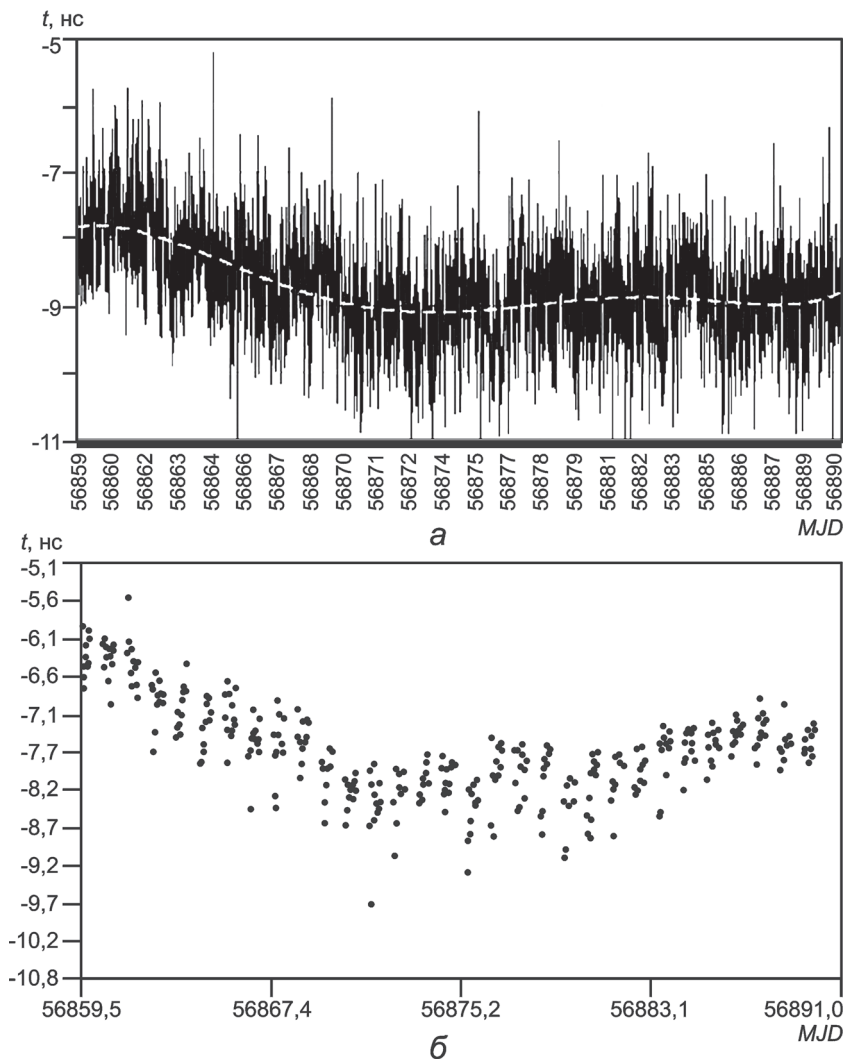


Рис. 2. Сравнение шкал времени эталонов дифференциальным методом по сигналам глобальной навигационной спутниковой системы (а) и методом TWSTFT (б)

(1 PPS). Работа имитатора сигналов и приемного устройства от единого опорного источника гармонических сигналов невозможна без стандарта частоты в схеме измерений, при этом достаточно использовать рубидиевый стандарт частоты.

На рис. 1, а, б в качестве примера приведены результаты калибровки антенны и приемного устройства опорного (калиброванного) комплекта БИС.

Для подтверждения правильности подхода, применяемого для абсолютной калибровки БИС, был проведен эксперимент по сравнению физических реализаций шкал времени государственного первичного эталона единиц времени и частоты Российской Федерации и эталона единиц времени и частоты, расположенного в Национальном институте метрологии Германии (PTB). Эксперимент проводили с использованием дифференциального метода сравнений шкал времени по сигналам ГНСС и дуплексного метода (TWSTFT) сравнений этих шкал по спутниковому каналу связи. На каждом из эталонов расположены комплекты БИС с

известными значениями ГВЗ навигационных сигналов в радиоприемных трактах и комплекты наземной аппаратуры, реализующие TWSTFT. Так как для комплекта БИС, расположенного в PTB, известны только значения ГВЗ сигналов GPS, то в качестве измерений использовали L3P-измерения GPS (ионосферно-свободная комбинация, вычисленная по результатам L1, L2 кодовых измерений GPS). Расстояние между эталонами — порядка 1780 км, продолжительность эксперимента — 30 сут.

На рис. 2, а, б приведены результаты сравнения физических реализаций шкал времени эталонов с использованием дифференциального метода по сигналам ГНСС и метода TWSTFT.

Метод TWSTFT является высокоточным и всемирно признанным для сравнения шкал времени территориально разнесенных эталонов единиц времени и частоты. По результатам эксперимента расхождения результатов сравнений физических реализаций шкал времени эталонов с использованием дифференциального метода по сигналам ГНСС и метода TWSTFT составили не более 1—2 нс, что свидетельствует о правильности подхода, применяемого для абсолютной калибровки БИС.

Также подтверждением корректности калибровочных поправок опорного комплекта БИС являются проводимые в настоящее время мероприятия по повышению точности передачи национальной шкалы времени UTC (SU) потребителям. В соответствии с документом [7] шкала времени UTC (SU) передается ГЛОНАСС при учете поправки к шкале системного времени относительно UTC (SU) τ_c на каждом НКА. На рис. 3 приведены результаты оценки поправок τ_c по L3P-измерениям ГЛОНАСС, выполненные опорным комплектом БИС, и значения поправок τ_c , учитываемых в НКА.

Из рис. 3 следует, что поправка τ_c , рассчитываемая по L3P-измерениям ГЛОНАСС опорного комплекта БИС, согласуется с поправкой τ_c , учтенной в НКА после 18 августа 2014 г., когда была введена коррекция поправки на 217 нс в целях обеспечения соответствия системы ГЛОНАСС целевому индикатору ФЦП [1].

Закключение. Обеспечение единства измерений, проводимых ГЛОНАСС, и создание необходимых комплексов метрологического обеспечения являются обязательными условиями для достижения ГЛОНАСС целевых индикаторов и показателей реализации федеральной целевой программы [1], что, в свою очередь, делает возможным массовое внедрение отечественных навигационных технологий, гарантированное предоставление потребителям всех категорий навигационных услуг с учетом непрерывно возрастающих требований к ним в интересах национальной безопасности и социально-экономического развития страны и укрепления ее лидирующих позиций в области глобальной спутниковой навигации.

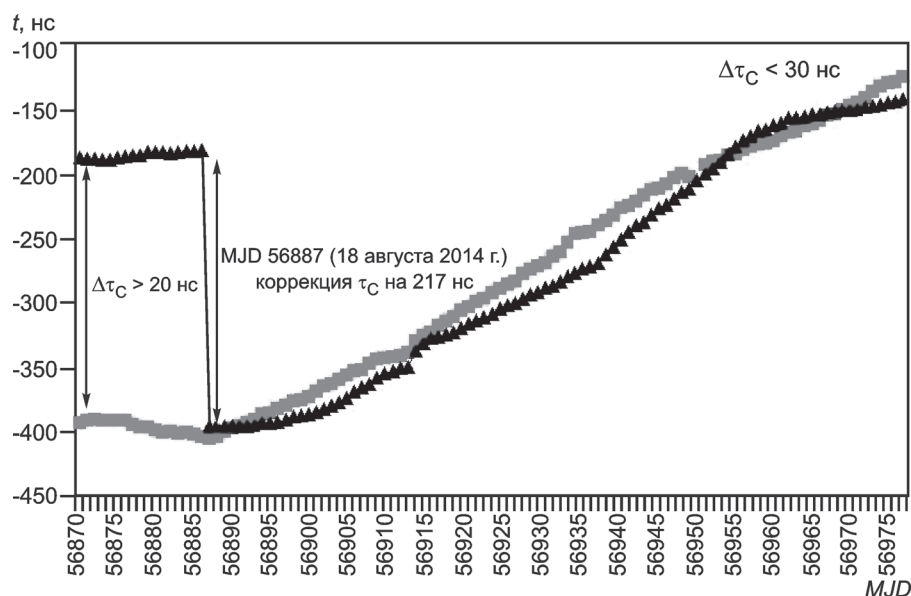


Рис. 3. Результаты оценки поправок по измерениям ГЛОНАСС:

1 — L3P; 2 — τ_c

Литература

1. **Федеральная** целевая программа «Поддержание, развитие и использование ГЛОНАСС на 2012—2020 годы» (ГЛОНАСС-2020). [Электрон. версия]. <http://fcp.economy.gov.ru/cgi-bin/cis/fcp.cgi/Fcp/ViewFcp/View/2012/396> (дата обращения 24.09.2014 г.).

2. **Федеральный** закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».

3. **ГОСТ Р 52928—2010**. Система спутниковая навигационная глобальная. Термины и определения.

4. **ГОСТ Р 8.750—2011**. ГСИ. Государственная поверочная схема для координато-временных средств измерений.

5. **Перов А. И., Харисов В. Н.** ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. М.: Радиотехника, 2010.

6. **Федотов В. Н.** Оценка погрешностей беззапросных средств измерений ГЛОНАСС // Измерительная техника. 2009. № 1. С. 25—28; **Fedotov V. N.** Estimation of the errors of query-free measuring instruments used in GLONASS // Measurement Techniques. 2009. V. 52. N. 1. P. 37—41.

7. **Глобальная** навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Версия 5.1. М.: 2008. [Электрон. ресурс]. <http://www.aggf.ru/gnss/glon/ikd51ru.pdf> (дата обращения 09.09.2014 г.).

Дата принятия 10.11.2014 г.

621.3.088

Метод измерения мощности ортогональных составляющих сигналов глобальных навигационных спутниковых систем

А. С. ЗАВГОРОДНИЙ, Д. С. ПЕЧЕРИЦА

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: zavgor@vniiftri.ru

Рассмотрен метод измерения мощности ортогональных составляющих навигационного сигнала. Отмечено основное отличие предложенного метода от существующих, заключающееся в математической обработке демодулированного навигационного сигнала, которая позволяет измерять мощность при любой разности частот источника навигационного сигнала и демодулятора.

Ключевые слова: глобальные навигационные системы, ГЛОНАСС, GPS, мощность, квадратура.

A method of measuring the power of navigation signals orthogonal components is considered. The main feature of the proposed method is a mathematical processing after GNSS signals demodulation. The method allows to measure the power at any difference of values of frequencies of navigation signal source and of demodulator.

Key words: global navigation system, GLONASS, GPS, power, quadrature.

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) находят все более широкое применение. В настоящее время технологии спутниковой навигации используют в системах контроля транспортного потока и обеспечения безопасности, авиации, геодезии, а также при исследовании атмосферы и в других областях. Мировая практика построения систем спутниковой навигации (ГЛОНАСС, GPS, Galileo) под-

разумевает применение сигналов, обеспечивающих различный доступ пользователей к системам [1]. В ГНСС предусмотрены сигналы с открытым доступом, описание которых приведено в интерфейсных контрольных документах, и сигналы, предназначенные для специализированного применения, т. е. доступ к ним ограничен. В большинстве случаев сигналы с открытым и ограниченным доступом излучаются