

## Совершенствование запросной технологии расчета эфемерид ГЛОНАСС

© В. В. Пасынков<sup>1</sup>, Р. В. Бакитько<sup>2</sup>, А. В. Круглов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «НПК «СПП», г. Москва, Россия

<sup>2</sup>АО «Российские космические системы», г. Москва, Россия

Использование запросных измерительных средств нового поколения и бортовой аппаратуры межспутниковых измерений в системе ГЛОНАСС позволяет обеспечить паритетный и даже опережающий уровень расчета эфемерид без копирования технологических подходов, принятых в зарубежных ГНСС. Представлены результаты исследования модернизированной запросной технологии эфемеридного обеспечения системы ГЛОНАСС на основе запросных станций нового поколения из состава наземного сегмента ГЛОНАСС, а также комплексирования запросных измерений с межспутниковыми измерениями и РСДБ-измерениями комплекса «Квазар-КВО».

**Ключевые слова:** параметры вращения Земли, всемирное время, радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами, колокация, ГЛОНАСС.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.50.58-72>

### Введение

Запросная технология баллистико-эфемеридного обеспечения ГЛОНАСС изначально была основной, так как точность запросных измерений не зависела от характеристик бортовых синхронизирующих устройств космических аппаратов (КА) и, как следствие, была существенно точнее вариантов обработки беззапросных измерений. В 2007 г. вследствие существенного улучшения характеристик бортовых синхронизирующих устройств КА в системе ГЛОНАСС перешли на беззапросную технологию расчета эфемерид. Если говорить о точности эфемерид, произошло небольшое ухудшение, но по ряду причин это было вынужденное решение, так как вследствие существенного улучшения точности частотно-временных поправок к бортовым шкалам времени КА точность радионавигационного поля ГЛОНАСС в целом существенно улучшилась.

До 2011 г. точность расчета эфемерид улучшалась прежде всего за счет увеличения числа и изменения топологии беззапросных измерительных станций (БИС). Однако ожидаемое улучшение точности эфемерид достигнуто не было ввиду неразмещения примерно трети от запланированного числа БИС, без которых оказалось невозможным перейти к технологии обработки вторых разностей фазовых измерений.

При этом запросной технологии была необоснованно определена второстепенная роль, хотя фактических предпосылок для ее улучшения было достаточно. Далее в наземном сегменте (НС) ГЛОНАСС появились запросные измерительные станции нового поколения, с характеристиками точности

дальномерных запросных измерений, которые в несколько раз превысили как точность запросных измерений станций предыдущего поколения, так и имеющих в НС беззапросных кодовых измерений, а число таких станций достигло уровня, который был утрачен вследствие распада СССР.

Можно уверенно утверждать, что созданная по предыдущей федеральной целевой программе (ФЦП) ГЛОНАСС запросная измерительная система (ЗИС) является лучшей отечественной радиотехнической станцией, созданной за все время существования ГЛОНАСС.

Возможно, что про запросную технологию больше бы и не вспомнили, если бы не два фактора. Во-первых, была поставлена задача многократного улучшения точности геодезического обеспечения привязки фазовых центров антенных систем (ФЦ АС) ЗИС к геоцентру, а, во-вторых, вследствие старения орбитальной группировки и ухудшения характеристик бортовых синхронизирующих устройств по мере роста срока активного существования стали вынужденно чаще прибегать к фактической реализации расчета эфемерид по запросной технологии.

### **Улучшение геодезического обеспечения привязки координат запросных станций**

Современные требования к точности привязки координат станций ФЦ АС ЗИС в ПЗ-90.11 эквивалентны требованиям к точности привязки АС беззапросных станций.

На КА ГЛОНАСС первого поколения бортовые фазовые задержки (БФЗ) выводились на заводе-изготовителе в ноль, а в процессе орбитальной эксплуатации их вариации были незначимыми для требуемого уровня точности запросных измерений. Наоборот, на запросных станциях первого поколения основная проблема была в калибровке и стабилизации систематической задержки измерения. По этой причине при выбранном на начальном этапе развития ГЛОНАСС методическом подходе не стояла задача разделения систематической погрешности в бортовом (бортовая аппаратура ЗИС) и наземном тракте измерений.

На КА ГЛОНАСС второго поколения (серии «Глонасс-М») БФЗ уже не были нулевыми. Более того, наблюдаемые в процессе орбитальной эксплуатации фактические значения БФЗ существенно отличались от формулярных. До тех пор пока в составе ОГ оставались КА первого поколения, предоставлялась возможность уточнения задержек КА серии «Глонасс-М» в относительном режиме относительно одного или нескольких КА первого поколения серии «Глонасс» по выбранной технологии. После завершения работы с последним КА серии «Глонасс» такая возможность была безвозвратно утрачена.

На текущем этапе не представляется возможным разделить фазовую задержку в бортовом и наземном трактах ввиду их линейной зависимости. Как следствие, точность расчета координат с использованием старой методической схемы оказалась крайне низкой и достигала уровня нескольких дециметров, что следовало из результатов сравнения уточнения координат на многолетних интервалах.

Ситуация для запросных измерительных станций нового поколения усугублялась тем, что они не имели собственных тропосферных и ионосферных каналов. Предполагалось использование для этих целей соседней беззапросной станции. Однако не на всех пунктах эксплуатации (ПЭ) такое совмещение было реализовано.

Результаты оценок БФЗ на КА второго поколения показали, что их вариации в процессе штатной эксплуатации незначительны, и следовательно, необходимо было найти способ их надежного уточнения в условиях отсутствия в составе системы ГЛОНАСС КА с нулевыми значениями бортовых задержек. Такая методическая схема была найдена.

Для улучшения точности расчета координат по собственным измерениям было сделано следующее:

- для улучшения точности учета тропосферы брались апостериорные результаты уточнения значения зенитной задержки от близстоящей БИС, а для тех ЗИС, которые не имели соседней БИС, использовались тропосферные карты;

- для улучшения точности учета ионосферы брались задержки, полученные по измерениям близстоящей БИС, а для тех ЗИС, которые не имели соседней БИС, использовались ионосферные карты. Однако в последующем, вследствие необходимости регулярной калибровки БИС по литерным задержкам (примерно в 60 % случаев ионосфера по измерениям БИС имеет отрицательный знак, что противоречит физическому смыслу), использовались только ионосферные карты;

- для повышения точности учета выносов ФЦ бортовых АС ЗИС относительно центра масс (ЦМ) КА были уточнены их значения относительно продольной оси связанной с КА системы координат ( $X_{св}$ ) (табл. 1);

- для повышения точности учета ФЦ наземных АС ЗИС была разработана параметрическая модель [1], которая учитывает температурную деформацию АС, а в состав уточняемых параметров стал включаться параметр выноса ФЦ АС ЗИС, что позволило разделить фазовую задержку в бортовой и наземной аппаратуре.

Оппоненты запросной технологии могут упрекнуть, что для успешного применения ЗИС нового поколения нужно специально организовывать технологические циклы по расчету параметров тропосферной и ионосферной рефракции по беззапросной технологии. Однако это не так.

Результаты эксплуатации радиометров водяного пара на узлах колокации комплекса «Квazar-КВО» показали высочайшую эффективность этих изделий для компенсации параметров тропосферы [2]. С учетом принятых решений об установке на пунктах эксплуатации радиометров водяного пара, использование измерений которых позволяет успешно парировать «влажную» составляющую тропосферной задержки, зависимость запросной технологии от беззапросной нивелируется.

Ионосферная рефракция для частотного диапазона ЗИС не является определяющим фактором, и ее учет по ионосферным картам улучшает точность интерпретации запросных измерений в сравнении с модельными значениями. Как известно [3], начиная с КА серии «Глонасс-К», параметры ионосферной модели включены в кадр цифровой информации, а в НС реализуется цикл

расчета соответствующих параметров. Следовательно, зависимость запросной технологии от наличия соответствующих данных в контуре расчета эфемерид попросту отсутствует, и создавать специальные технологические циклы по расчету ионосферных данных не требуется.

После предварительного оценивания точности методом статистического имитационного моделирования был выбран рациональный (сознательно уйдя от термина «оптимальный») интервал аппроксимации измерений и лучший вариант уточнения выноса АС ЗИС, то есть определено количество уточняемых значений выносов на интервале аппроксимации.

Уточненные средние значения (по всей ОГ ГЛОНАСС) выносов АС бортовой аппаратуры БА ЗИС относительно ЦМ КА в пределах одного сантиметра совпали со значениями выносов, уточненных по лазерным измерениям квантовых оптических систем для оптических ретрорефлекторных антенных систем (ОРАС). Это позволило сделать вывод, что уточненные поправки относятся к смещению ЦМ от номинального значения, так как относительные значения смещений ОРАС относительно АС БА ЗИС остались практически неизменными, что в последующем позволяет использовать уточненные относительно ЦМ поправки ОРАС для всех типов БА как смещение ЦМ КА.

В качестве усовершенствованной технологической схемы уточнения координат выбрана многопунктовая (все ЗИС) и многоорбитальная (все КА) технология с одновременным уточнением БФЗ для каждого КА, выноса АС ЗИС (с предварительным вычитанием поправки, внесенной на станции) и трех координат каждой станции.

Антенные системы ЗИС, как правило, установлены на крышах ранее построенных технических зданий и сооружений. Специальных фундаментов для установки не создавалось. По данным разработчиков, через кровлю выведены опорные площадки (бетон) под крепление основания под антенну (сталь). Крепление основания к бетонным площадкам выполнено с помощью анкерных болтов. Обычно эти бетонные опоры, армированные арматурой или стяжными шпильками, просто опираются на элементы жесткости здания и не имеют сквозного прохода через здание. Высота установки на крышах АС ЗИС, как правило, составляет 20–30 м.

Учет температурных деформаций за счет температуры антенны  $T_a$  и температуры фундамента  $T_f$  производится путем введения дополнительной фазы  $\Delta t_a$  и  $\Delta t_f$ :

$$T_a = T(t - \Delta t_a), T_f = T(t - \Delta t_f).$$

Рекомендуемые значения:  $\Delta t_a = 2$  ч и  $\Delta t_f = 6$  ч, однако эти величины получены при исследовании небольшого числа антенн и требуют уточнения для АС ЗИС. Поэтому значения  $T_a$  и  $T_f$  на практике принимаются равными температуре окружающего воздуха  $T$ , то есть  $\Delta t_a = \Delta t_f = 0$ .

В ЗИС реализована трехосная «альт-альт-азимутальная» антенная система. Третья ось стоит в нуле, т. е. не используется, что приводит к «альт-азимутальному» типу антенны. В модели температурной деформации используются термальные коэффициенты:  $\gamma_a, \gamma_f, h_a, h_p, h_v, h_s$ .

В качестве расчетного соотношения поправки к дальности для «альт-азимутального» типа подвески АС выбрана формула [1]:

$$\Delta D_{\text{therm}} = \left( \gamma_f (T - T_0) h_f \cos(z - \Delta z) + \gamma_a (T - T_0) (h_p \cos(z - \Delta z) + h_v - fh_s) - a_{\text{axisoff}} \gamma_a (T - T_0) \sin(z - \Delta z) \right) - \quad (1)$$

где

$\gamma_f$  — коэффициент температурного расширения фундамента антенны (для ЗИС — армированный бетон);

$T$  — температура окружающего воздуха;

$T_0$  — опорная (референсная) температура (в международной практике рекомендуется использовать значения средних температур для каждой из станций, если значение недоступно, то в мире используется значение 20°C, но для территории РФ среднее значение годовой температуры существенно отличается: варьируется от -22°C до +18°C, поэтому для каждого пункта размещения ЗИС следует выбирать значение исходя из конкретного места установки АС);

$h_f$  — высота фундамента опоры;

$z = \frac{\pi}{2} - \gamma$  — зенитный угол;

$\Delta z$  — поправка зенитного угла на рефракцию;

$\gamma_f$  — коэффициент температурного расширения антенны (ЗИС — железо);

$h_p$  — высота антенного столба (по данным разработчика);

$h_v$  — высота вертекса (из конструкции антенны);

$f$  — дифферент фокуса антенны ЗИС (второй тип фокуса);

$h_s$  — высота контррефлектора (из конструкции антенны);

$a_{\text{axisoff}}$  — калибровочное значение выноса антенны на станции.

В процессе отработки технологии установлено, что вариации выносов по модели (1) находятся на сантиметровом уровне, что может быть обусловлено факторами деформации АС под влиянием ветровых нагрузок, деформацией под собственным весом АС и др. Поскольку образцового (эталонного) значения выноса нет, этот параметр можно интерпретировать как среднеквадратическое отклонение (СКО) воспроизводимого результата в принятой схеме оценивания.

Отметим, что уточнение технологического цикла выноса АС вместо систематической погрешности для станции улучшает согласованность измерений на интервале обработки более чем в 5 раз. Например, при таком подходе воспроизводимость координат АС от решения к решению улучшается почти на порядок.

Неопределенным фактором остается температурная деформация крыши здания или сооружения, на которых смонтирована АС ЗИС. Внешние стены можно считать подверженными внешнему изменению температуры, чего однозначно нельзя сказать о крыше зданий и сооружений с учетом наличия систем кондиционирования и отопления, поддерживающих среднюю внутреннюю температуру ~ 20°C.

По оценке уровень неопределенности получился весьма значимым. На пунктах эксплуатации, где размещены ЗИС, вариации температуры за год достигают значений от 70°C до 90°C. То есть при высоте размещения АС ЗИС 20–30 м и средней вариации температуры за год 80°C имеем 1.6–2.4 см.

Таким образом, при фактическом уровне вариации температуры для бетона и фактической высоты зданий годовое изменение высот может превышать величину 2 см, что соизмеримо с уровнем требований к точности расчета координат станций.

По-видимому, при выборе мест размещения АС рекогносцировочные комиссии этот аспект не принимали во внимание, но резко континентальный климат большинства пунктов эксплуатации средств НС системы ГЛОНАСС по этому фактору проявляется в полной мере.

Для улучшения точности интерпретации измерений были уточнены значения геометрического выноса АС БА ЗИС относительно ЦМ КА, математическое ожидание (МО) и СКО, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Поправки к формулярным выносам БА ЗИС относительно ЦМ КА (относительно апостериорных эфемерид СВОЭВП<sup>1</sup>)

<b>КА</b>	<b>715</b>	<b>716</b>	<b>717</b>	<b>719</b>	<b>720</b>	<b>721</b>	<b>723</b>	<b>730</b>	<b>731</b>	<b>732</b>	<b>733</b>	<b>734</b>
МО	5.6	1.4	2.6	4.1	3.5	2.2	2.0	1.8	4.2	5.2	5.0	2.7
СКО	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.5	0.5	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5
<b>КА</b>	<b>735</b>	<b>736</b>	<b>737</b>	<b>738</b>	<b>742</b>	<b>743</b>	<b>744</b>	<b>745</b>	<b>746</b>	<b>747</b>	<b>754</b>	<b>755</b>
МО	4.3	4.5	0.8	3.6	2.8	2.5	3.5	3.1	2.2	3.4	4.1	2.4
СКО	0.2	0.5	0.3	0.4	0.3	0.2	0.2	1.3	0.2	0.2	0.3	0.1

Примечание. <sup>1</sup>СВОЭВП — система высокоточного определения эфемерид и временных поправок (<http://glonass-svoevp.ru>).

Анализ данных табл. 1 показывает, что уточненные поправки к формулярным значениям выносов ФЦ АС БА ЗИС варьируются от 0.8 до 5.6 см (МО) со средним значением 3.2 см.

Воспроизводимость оценок от решения к решению достаточно высокая и составляет 0.2–0.5 см (кроме КА №745, для которого СКО оценок выше среднего уровня в 4 раза).

Аналогичные расчеты ранее были проведены по лазерно-оптическим измерениям при уточнении выноса ОРАС относительно ЦМ в эксперименте LARGE-1 [4].

Сравнение величин поправок к выносам ФЦ ОРАС и АС БА ЗИС показало, что значение поправки выноса ФЦ ОРАС составляет ~3.6 см, а АС БА ЗИС — ~3.2 см, то есть с учетом погрешностей оценки практически совпадают между собой. По этой причине напрашивается вывод о том, что наиболее вероятной причиной наблюдаемых рассогласований является неправильный замер (расчет) на заводе-изготовителе ЦМ КА, либо методические ошибки пересчета соответствующих замеров при включении в формуляр.

Если эта гипотеза верна, то наиболее вероятными причинами погрешностей интерпретации (или замеров) фактического положения ЦМ на КА могут быть погрешности, обусловленные установкой панелей солнечных батарей на КА после определения ЦМ, заправкой топливом или последующей выработкой топлива на КА в процессе его эксплуатации. По абсолютной величине полученные поправки к выносу АС БА ЗИС также, как и в случае с ОРАС, достигают единиц сантиметров, то есть являются значимыми.

По многопунктовой (все ЗИС) и многоорбитальной (все КА) технологии с учетом интерпретации запросных измерений уточненных значений выносов АС БА ЗИС выполнено уточнение координат станций ЗИС на интервалах январь — март 2015 г. (23–24 КА), февраль — апрель 2017 г. (22–24 КА) и сентябрь — декабрь 2018 г. (22–25 КА). Результаты уточнения в виде СКО вариаций координат по широте (В), высоте (Н) и долготе (L) соответственно представлены в табл. 2.

Таблица 2

Оценка СКО вариаций уточненных координат станций ЗИС на трех пунктах эксплуатации (на ПЭ-14, 20 — по два комплекта)

Год	ПЭ-04			ПЭ-14(1)			ПЭ-14(2)			ПЭ-20(1)			ПЭ-20(2)		
	В	Н	L	В	Н	L	В	Н	L	В	Н	L	В	Н	L
	см														
2015	3	18	1	1	7	1	1	14	1	1	10	1	1	11	2
2017	2	17	1	4	12	3	2	7	1	2	6	1	2	6	1
2018	1	12	2	1	6	2	2	5	3	3	8	2	3	8	3

Примечание. В качестве эфемерид КА использовались апостериорные данные СВОЭВП.

Анализ данных табл. 2 показывает, что вариации координат по широте и долготе находятся на уровне 2–3 см и не превышают 4 см, а по высоте 6–7 см, кроме ПЭ-04. Более высокий уровень вариаций для ПЭ-04 наиболее вероятно обусловлен недостаточным уровнем точности интерпретации тропосферной задержки по тропосферным картам, как известно, обладающим точностью порядка 3 см в зените. Тем не менее, точность расчета координат ЗИС улучшена практически на порядок.

### Оценка улучшения точности эфемерид по модернизированной запросной технологии

Результаты улучшения геодезической привязки позволили поставить вопрос, насколько улучшится расчет эфемерид по многоорбитальной и многопунктовой технологии по измерениям ЗИС.

Для ответа на этот вопрос, как и в случае геодезического цикла, при расчете кинематических параметров движения и трех коэффициентов разложения модели радиационного давления для каждого КА в состав уточняемых параметров включались БФЗ для каждого КА и значения выноса АС ЗИС для каждой станции. Интервал аппроксимации измерений соответствовал длительности интервала, принятого для расчета орбит в контуре системы ГЛОНАСС.

Оценивание точности расчета эфемеридной информации (ЭИ) по измерениям ЗИС проводилось на интервале с 01.03.2017 по 25.04.2017 путем оценивания 6-часового прогноза оперативной ЭИ по КА системы ГЛОНАСС относительно эталонной ЭИ, в качестве которой выступали апостериорные эфемериды СВОЭВП. Эквивалентная погрешность дальности (с вероятностью

0.95) за счет апостериорной эфемеридно-временной информации СВОЭВП по данным КОС составляет 5 см, кроме КА 723 и 733, функционирующих в одночастотном режиме.

Оценивание проведено по методикам, принятым в ГЛОНАСС в настоящее время. Результаты оценивания точности 6-часового прогноза ЭИ представлены в табл. 3. Предельная величина эквивалентной погрешности дальности 6-часового прогноза оперативной эфемеридной информации по региональной сети БИС модернизированного наземного комплекса управления ГЛОНАСС за счет космического сегмента (с вероятностью 0.95) составила 0.54 м.

При оценивании из состава ОГ были исключены: КА № 702 по причине недостаточной точности запросных измерений ЗИС по КА серии «Глонасс-К», № 716 и № 735 из-за недостаточного объема запросных измерений, одночастотные КА № 723 и № 733 из-за недостаточной точности эталонных данных.

Т а б л и ц а 3

Обобщенные (по всем КА) результаты оценки 6-часового прогноза эфемерид, рассчитанных по модернизированной запросной технологии с использованием 5 ЗИС

МО, м				СКО, м				Re <sup>0.67</sup>	Re <sup>0.95</sup>	Re <sup>макс</sup>
Mr	Ml	Mn	MR	$\sigma_r$	$\sigma_l$	$\sigma_n$	$\sigma_R$	м		
0.23	0.98	0.18	0.27	0.10	0.51	0.06	0.13	0.37	0.54	0.65

Для сравнения технология расчета орбит по вторым разностям БИС на территории РФ дает выигрыш примерно 30 % (табл. 4), но ожидать появления в ближайшее время в НС ГЛОНАСС такого числа станций пока не приходится.

Т а б л и ц а 4

Обобщенные (по всем КА) результаты оценки 6-часового прогноза эфемерид, рассчитанных по технологии вторых разностей измерений 20 БИС (РФ)

МО, м				СКО, м				Re <sup>0.67</sup>	Re <sup>0.95</sup>	Re <sup>макс</sup>
Mr	Ml	Mn	MR	$\sigma_r$	$\sigma_l$	$\sigma_n$	$\sigma_R$	м		
0.17	0.78	0.31	0.20	0.08	0.42	0.15	0.08	0.23	0.35	0.44

До 2008 г. оценивание точности эфемерид ГЛОНАСС проводилось в орбитальной системе координат по направлениям: по радиусу ( $r$ ), вдоль орбиты ( $l$ ) и по бинормали ( $n$ ). После 2008 г. было введено понятие эквивалентной погрешности псевдодальности, которое для эфемерид суммировало погрешности в орбитальной системе координат коэффициентом 7 по направлениям вдоль орбиты, по бинормали и по радиус-вектору ( $r$ ).

Mr,  $\sigma_r$  — МО и СКО по направлению радиус-вектора;

Ml,  $\sigma_l$  — МО и СКО по направлению вдоль орбиты;

Mn,  $\sigma_n$  — МО и СКО по бинормали;

MR,  $\sigma_R$  — МО и СКО в пересчете погрешностей в орбитальной системе координат в эквивалентную погрешность псевдодальности.

Напомним, что в настоящее время в наземном сегменте ГЛОНАСС реализуется 8–10 десятиминутных сеансов в сутки по каждому КА ОГ. Это количество в 3 раза меньше изначально обоснованного на этапе проектирования системы числа сеансов для орбит типа ГЛОНАСС.

Исторически сокращение числа сеансов произошло вынужденно, так как после распада СССР значительная часть станций первого поколения осталась на территориях современной Украины и Казахстана. И чтобы обеспечить расчет орбит КА при первом развертывании системы в 1992–1994 гг. пришлось резко сократить изначально обоснованное число сеансов до 6 в сутки, что, конечно, существенно ухудшило точность эфемерид.

Тем не менее, анализ полученных результатов показывает, что при фактической топологии ЗИС (три ПЭ), их количестве (5 станций) и фактически реализованной точности запросных дальномерных измерений, а также при текущем уровне планирования сеансов ЗИС полученная точность эфемерид по модернизированной запросной технологии лучше существующей беззапросной (реализуемой в контуре ГЛОНАСС на этом же интервале) примерно в 1.5 раза.

При этом следует отметить, что и по числу, и по топологии станции ЗИС существенно уступают имеющейся сети БИС.

Если сравнивать полученную точность эфемерид по запросной технологии с имеющимся уровнем лучших на текущем этапе ГНСС Galileo и GPS, то становится ясно, что полученная в результате численного эксперимента точность ЭИ эквивалентна текущим характеристикам Galileo и даже лучше, чем точность ЭИ GPS, что подтверждает возможность доведения точности эфемерид ГЛОНАСС до соответствующего уровня точности ближайших конкурентов даже по имеющемуся в наличии в наземном комплексе управления составу средств.

Этот результат можно было бы считать важным, однако для системы ГЛОНАСС в нем нет ничего необычного. Так было всегда: запросная технология на всех этапах создания и развития системы была лучше беззапросной, а отечественные технологии ни в чем не уступали зарубежным.

С учетом планируемого включения до окончания ФЦП в состав наземного сегмента ГЛОНАСС 5 ранее изготовленных ЗИС помимо количественного увеличения, которое потенциально позволит увеличить число сеансов по каждому КА, будет существенно улучшена топология станций как по широте, так и по долготе.

Поскольку на всех ПЭ наземных средств системы ГЛОНАСС будут размещены радиометры водяного пара, это позволит существенно улучшить точность интерпретации запросных измерений по тропосферной компоненте.

Вполне ожидаемо, что по модернизированной запросной технологии точность расчета эфемерид улучшится.

### **Дополнение модернизированной запросной технологии баллистико-эфемеридного обеспечения межспутниковыми измерениями**

На современных КА системы ГЛОНАСС реализована межспутниковая радиолиния, позволяющая из встречных измерений сформировать аналог запросной дальности между двумя КА. Случайная погрешность запросных меж-

спутниковых измерений (МСИ) имеет примерно эквивалентную точность с запросными измерениями ЗИС, то есть бортовой измеритель также имеет один из лучших показателей точности дальномерных измерений, когда-либо имевшихся в системе ГЛОНАСС.

Сразу же после запуска первой пары спутников, оснащенных бортовой аппаратурой межспутниковых измерений была выявлена существенная систематическая погрешность измерений, достигающая нескольких сот метров, обусловленная конструктивными особенностями аппаратуры. В табл. 5 приведена оценка систематической составляющей погрешности полусуммы измерений бортовой аппаратурой межспутниковых измерений для некоторых пар КА на интервале 2015 г.

Последующий анализ МСИ показал, что систематическая погрешность стабильна на длительных интервалах времени, а особенность этих измерений такова, что при наличии в технологической цепочке трех и более КА, проводящих встречные МСИ и позволяющих сформировать суммарные запросные измерения, возникает возможность включения в состав уточняемых параметров систематической погрешности для каждого КА, и она с точностью исходных измерений уверенно разрешается в многоорбитальном режиме.

Таблица 5

Результаты оценивания систематических составляющих погрешностей для суммарных межспутниковых измерений

КА1	744	734	742	734	733	733	744	742	733	734	745	745	744	747
КА2	734	733	733	738	738	743	742	734	745	745	738	743	738	738
МО, м	170.9	158.5	168.9	169.9	169.2	171.0	181.3	169.5	170.0	170.6	181.8	183.4	181.9	181.2

Поскольку значение систематической погрешности существенно зависит от комплектации, то априорное уточнение не имеет смысла, а сама возможность ее уточнения в технологическом цикле делает такой анализ ненужным.

Дополнение запросных измерений ЗИС межспутниковыми измерениями проведено в варианте фактического состава межспутниковых измерений, у которых бортовые комплекты доработаны по результатам испытаний.

Оценивание модернизированной технологии проведено по следующей схеме: интервал аппроксимации, выбранный (обоснованный) для обработки измерений ЗИС, не изменялся, а только дополнялся МСИ. Дополнительно в состав уточняемых параметров включалась задержка в трактах бортовой межспутниковой радиолинии для каждого КА. Вполне очевидно, что для суммарных измерений задержка в приемо-передающих трактах каждого КА разделяется и уточняется как линейно независимая составляющая.

В оценку включены только те КА, по которым был достаточный объем МСИ. На интервале оценивания запросной технологии 01.03.2017–25.04.2017 гг. таких КА было восемь: 4 КА из первой плоскости и по 2 КА из второй и третьей.

Обобщенные результаты (по всем КА, проводившим МСИ) оценки точности полученной ЭИ представлены в табл. 6.

Обобщенные результаты оценки 6-часового прогноза эфемерид,  
 рассчитанных по запросной технологии 5 ЗИС  
 и привлечением межспутниковых измерений

МО, м				СКО, м				Re <sup>0.67</sup>	Re <sup>0.95</sup>	Re <sup>макс</sup>
Mr	Ml	Mn	MR	$\sigma_r$	$\sigma_l$	$\sigma_n$	$\sigma_R$	м		
0.13	0.55	0.11	0.16	0.06	0.30	0.04	0.07	0.21	0.30	0.38

Проведем сравнение запросной технологии (ЗИС+МСИ) с точностью, которая достигается по беззапросной технологии обработки вторых разностей фазовых измерений с добавлением к 20 станциям на территории РФ 10 глобально расположенных станций.

Результаты оценки точности ЭИ по измерениям глобальной сети из 30 БИС представлены в табл. 7. Оценивание проводилось по всем КА орбитальной группировки (20–25 КА), но в таблице представлены только те из них, по которым проводилась оценка по запросной технологии.

Таблица 7

Обобщенные результаты (по всем КА) оценки 6-часового прогноза эфемерид,  
 рассчитанных по беззапросной технологии 30 глобальных БИС

МО, м				СКО, м				Re <sup>0.67</sup>	Re <sup>0.95</sup>	Re <sup>макс</sup>
Mr	Ml	Mn	MR	$\Sigma_r$	$\sigma_l$	$\sigma_n$	$\sigma_R$	м		
0.09	0.41	0.20	0.11	0.05	0.22	0.10	0.05	0.13	0.20	0.25

Предельная величина эквивалентной погрешности дальности 6-часового прогноза оперативной ЭИ по региональной сети ЗИС с привлечением фактического состава измерений бортовой аппаратурой межспутниковых измерений (с вероятностью 0.95) составила 0.30 м, что в полтора раза уступает результатам с использованием глобальной сети БИС. Однако достигаемый уровень соответствует планируемому уровню для эфемерид ГЛОНАСС на момент окончания исполнения текущей ФЦП.

Оппоненты могут сказать, что на текущем этапе погрешность эфемерид не является преобладающей. Это верно, погрешности частотно-временных поправок к бортовым шкалам времени КА системы ГЛОНАСС в настоящее время существенно превышают погрешности эфемерид. Однако перспектива установки на ГЛОНАСС бортовых синхронизирующих устройств на основе мазеров может существенно изменить ситуацию.

Например, КА Galileo, на борту которых функционирует мазер отечественной разработки, демонстрируют сантиметровую погрешность хранения бортовых шкал времени, и на первый план выходит задача высокоточного сравнения бортовой шкалы времени КА и шкалы времени наземной опорной станции.

Точность же навигационного поля при совместном использовании системы синхронизации на основе бортовых мазеров с эфемеридным контуром, реализующим модернизированную запросную технологию, позволит, например, реализовать технологию высокоточной навигации без использования функциональных дополнений.

## **Комплекси́рование запросных измерений с РСДБ-измерениями**

Высокоточный расчет орбит является необходимым, но не достаточным условием при расчете эфемерид. Эфемериды распространяются в системе координат, связанной с Землей (изначальное проектное решение как для ГЛОНАСС, так и для других навигационных систем), поэтому результирующая точность позиционирования и точность передачи полем национальной геоцентрической системы координат существенно зависит от точности расчета параметров вращения Земли (ПВЗ). Можно уверенно утверждать [5], что любые внешние ПВЗ (вне зависимости от их точности), полученные вне задачи расчета орбит, будут ухудшать точность эфемерид. Поэтому необходимо улучшать точность ПВЗ в задаче расчета орбит ГЛОНАСС.

В настоящее время созданы два радиотелескопа РТ-13 в обсерваториях «Зеленчукская» и «Бадары», которые 5 раз в сутки проводят интенсивные сессии в интересах оперативного определения всемирного времени. Примеры расчета всемирного времени по этим данным на интервале 06.05.2017–07.05.2017 гг. приведены в табл. 8 для четырех вариантов корреляционной обработки (0, 1, 2, 3), полученных по различным комбинациям частотных каналов. Оценка точности расчета ПВЗ проводилась относительно финального ряда ПВЗ Международной службы вращения Земли С04 (ITRF2014). Обозначение сессии: Л#-№, где Л — литера часа в сутках (А соответствует 0 часов UTC), # — номер варианта, № — номер суток года.

К недостаткам работы РТ-13 следует отнести относительно низкую точность оцифровки шкалы времени от опорного стандарта частоты на уровне 2–4 нс. Эта выявленная особенность привела к необходимости доработки задачи совместного уточнения орбит и ПВЗ в части уточнения систематической погрешности часов для каждой сессии индивидуально. При расчете всемирного времени в пределах одной сессии погрешность оцифровки РСДБ-измерений в 2 нс безусловно является незначимой. Однако при расчете орбит ГЛОНАСС совместно с расчетом ПВЗ возникает задача их краткосрочного прогнозирования. Для ее решения и возникает необходимость «склеивать» интенсивные сессии на последних двух сутках интервала аппроксимации измерений, что и приводит к необходимости отдельного уточнения систематической погрешности часов для каждой сессии индивидуально.

Оценки, полученные на интервале 2016–2018 гг., показали лучшие характеристики для корреляционной обработки по варианту 0. Этот вариант и был использован при оценке точности расчета ПВЗ при определении орбит ГЛОНАСС с комбинированием РСДБ-измерений по запросной технологии. При этом наблюдается устойчивая систематическая погрешность на уровне –20 мкс, которая может быть обусловлена поворотом базы РСДБ.

Пример оценки точности расчета всемирного времени, выполненного по РСДБ-измерениям РТ-13 («Зеленчукская» — «Бадары») для различных вариантов обработки

Сессия	ДМВ <sup>1</sup>	dUT1, с	СКО, с	$\Delta$ , С04 <sup>2</sup>
K0-126	06.05.2017 13:00	0.413817	0.000020	-0.000074
K1-126	06.05.2017 13:00	0.413836	0.000016	-0.000055
K2-126	06.05.2017 13:00	0.413819	0.000031	-0.000072
K3-126	06.05.2017 13:00	0.413836	0.000024	-0.000055
P0-126	06.05.2017 18:00	0.413567	0.000028	0.000033
P1-126	06.05.2017 18:00	0.413544	0.000023	0.000010
P2-126	06.05.2017 18:00	0.413583	0.000025	0.000049
P3-126	06.05.2017 18:00	0.413555	0.000020	0.000021
S0-126	06.05.2017 21:01	0.413298	0.000081	-0.000019
S1-126	06.05.2017 21:01	0.413278	0.000057	-0.000040
S2-126	06.05.2017 21:01	0.413283	0.000048	-0.000035
S3-126	06.05.2017 21:01	0.413288	0.000047	-0.000030
W0126	07.05.2017 01:00	0.413003	0.000022	-0.000030
W1-126	07.05.2017 01:00	0.413002	0.000020	-0.000031
W2-126	07.05.2017 01:00	0.412991	0.000013	-0.000042
W3-126	07.05.2017 01:00	0.412996	0.000012	-0.000037
F0-127	07.05.2017 08:00	0.412481	0.000035	-0.000059
F1-127	07.05.2017 08:00	0.412495	0.000029	-0.000045
F2-127	07.05.2017 08:00	0.412497	0.000028	-0.000043
F3-127	07.05.2017 08:00	0.412508	0.000023	-0.000032
K0-127	07.05.2017 13:00	0.412149	0.000016	-0.000046
K1-127	07.05.2017 13:00	0.412167	0.000015	-0.000028
K2-127	07.05.2017 13:00	0.412128	0.000017	-0.000067
K3-127	07.05.2017 13:00	0.412151	0.000015	-0.000044

Примечание. <sup>1</sup> ДМВ — декретное Московское время;

<sup>2</sup>С04 — финальный ряд ПВЗ Международной службы вращения Земли и систем отсчета.

Методическая схема комбинирования запросной технологии по измерениям ЗИС и РСДБ построена следующим образом. ПВЗ на первых сутках штатного интервала аппроксимации считаются известными, поэтому к выборке запросных измерений добавляются только 10 интенсивных РСДБ-сессий на последних двух сутках интервала. Каждая из РСДБ-станций оснащена радиометром водяного пара, поэтому при обработке интенсивных сессий необходимость уточнения «влажной» составляющей тропосферной задержки отпадает (кроме случаев осадков). Для каждого интервала РСДБ-измерений в состав

уточняемых параметров включается градиент в направлениях на север и восток и общий вынос (axis-off) для каждой РСДБ-станции. Состав измерений, интервал аппроксимации, состав уточняемых параметров и схема расчета для измерений ЗИС представлены ранее.

Сравнительные результаты оценки точности расчета ПВЗ по комбинированию РСДБ-измерений и запросной технологии с технологией, применяемой в настоящее время в НС ГЛОНАСС, приведены в табл. 9.

Т а б л и ц а 9

Сравнительная оценка точности расчета ПВЗ, рассчитанных по технологии, применяемой в НС ГЛОНАСС, и технологии комплексирования запросных измерений ЗИС с РСДБ-измерениями РТ-13 («Зеленчукская» — «Бадары») для варианта обработки 0

Параметр	НС ГЛОНАСС			ЗИС+РСДБ		
	Хр, мкс дуги	Ур, мкс дуги	$\Delta UT1$ , мкс	Хр, мкс	Ур, мкс	$\Delta UT1$ , мкс
$\Delta$ , С04	-33	-181	256	-127	-223	-33
СКО, С04	46	819	643	342	743	18
СКП, С04	57	880	729	384	817	29

Примечание. Хр, Ур — координаты мгновенного полюса Земли,  $\Delta UT1$  — поправка всемирного времени, СКП — средняя квадратическая погрешность.

Комплексирование запросных измерений ЗИС с РСДБ-измерениями вполне ожидаемо позволяет существенно улучшить точность расчета всемирного времени и демонстрирует паритетные характеристики по расчету координат полюса. В ближайшее время планируется включение в состав сети «Квazar-КВО» третьей станции в обсерватории «Светлое», что позволит долготную базу «Бадары» — «Светлое» дополнить широтной составляющей и существенно улучшить точность расчета координат полюса.

Актуальным остается вопрос определения относительных координат РСДБ-станций и ЗИС. Для его решения достаточным условием является обеспечение работы РСДБ-станций по сигналам ГЛОНАСС с последующей обработкой на специализированном корреляторе. Такую доработку необходимо провести в ближайшее время, поскольку вариант совмещения систем координат посредством «поворота» под финальный ряд ПВЗ представляется весьма сомнительным.

## Заключение

Отечественные технологии, которые подкреплены лучшими отечественными разработками радиотехнической дальномерной аппаратуры (ЗИС нового поколения и бортовая аппаратура межспутниковых измерений), позволяют достичь соответствующий зарубежным ГНСС или даже превосходящий

их уровень точности. В части расчета эфемерид он может быть достигнут без копирования принятых в GPS технологических подходов и реализован исключительно опираясь на отечественные технологии и разработки.

Не все технологии, разработанные за рубежом, следует принимать как образец для реализации в оперативном контуре системы ГЛОНАСС. Принимая во внимание, что наземный сегмент ГЛОНАСС по объективным причинам, по-видимому, в ближайшей перспективе не сможет стать глобальным, целесообразно рассматривать варианты построения технологических циклов с размещением станций только на территории РФ.

## Л и т е р а т у р а

1. Скурихина Е. А. Определение геодинамических параметров из долговременных рядов наблюдений [Текст]: дис. канд. физ-мат. наук. — СПб, 2004.

2. Титов Е. В., Широкий С. М., Ильин Г. Н., Троицкий А. В. Экспериментальные оценки точности учета тропосферной задержки навигационных сигналов ГЛОНАСС по данным абсолютного радиометра водяного пара // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2016. — Вып. 36. — С. 90–95.

3. Глобальная навигационная спутниковая система. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал открытого доступа с кодовым разделением в диапазоне L3. Редакция 1.0. — М.: 2016.

4. Пасынков В. В. и др. Анализ результатов LARGE-1 с точки зрения колокации бортовых устройств GNSS и КОС на КА ГЛОНАСС // 20th International Workshop on Laser Ranging. — Potsdam: 2016.

5. Жуков А. Н., Пасынков В. В. Направления совершенствования параметров вращения Земли наземного сегмента ГЛОНАСС // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2012. — Вып. 23. — С. 71–77.

## Improvements in the Active Measurement Technology to Calculate the GLONASS Ephemeris

V. V. Pasyнков, R. V. Bakitko, A. V. Kruglov

GLONASS uses the new generation active measurement tools and the onboard equipment for inter-satellite measurements thus keeping parity or even superiority in the ephemeris calculation accuracy without copying the technological approaches which are adopted in the GNSS abroad. This article presents the analysis of the data received as a result of the ephemeris support technology for the GLONASS system upgraded. Our studies use the GLONASS new generation stations and combine the Earth-based active measurements with inter-satellite measurements and with VLBI measurements of the Quasar network.

**Keywords:** Earth rotation parameters, Very Long Baseline Interferometry, collocation, GLONASS.