

УДК 621.396.99

В. В. ДВОРКИН, С. Н. КАРУТИН

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОГО НАВИГАЦИОННО- ВРЕМЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ГЛОНАСС

Проведен анализ требований к топологии глобальной сети измерительных станций. Предложена методика построения сети и выполнены экспериментальные исследования ее возможностей для высокоточного навигационно-временного обеспечения потребителей ГЛОНАСС. Сделаны выводы о направлении развития измерительных средств ГЛОНАСС.

Введение

Существенный прогресс в развитии ГЛОНАСС в последнее десятилетие привел к значительному росту количества ее потребителей в различных областях экономики, которые используют различные типы оборудования и предъявляют различные требования к услугам навигационного обеспечения.

Вместе с тем услуги системы ГЛОНАСС не в полной мере удовлетворяют перспективным требованиям потребителей [1, 2], которые предполагают необходимость уменьшения погрешности навигационных определений до 0.6 м (СКО) в абсолютном режиме без использования функциональных дополнений и 0.1 м (СКО) с привлечением информации функциональных дополнений.

Достижение подобных высоких точностных характеристик невозможно без решения задачи повышения точности прогнозирования эфемеридно-временной информации (ЭВИ) сигналов навигационных космических аппаратов (НКА). Существенный прогресс в данном направлении достигнут Международной службой глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) (International GNSS Service (IGS)) [3], которые обеспечивают апостериорную оценку эфемерид и частотно-временных параметров (ЧВП) радиосигналов НКА с эквивалентными погрешностями до 0.025 м (СКО) и 0.07 нс (СКО) соответственно.

Дворкин Вячеслав Владимирович. Доктор технических наук, главный конструктор направления, ОАО «Российские космические системы» (Москва).

Карутин Сергей Николаевич. Кандидат технических наук, заместитель начальника центра, ОАО «Российские космические системы».

При этом для оценки ЭВИ ГЛОНАСС с подобной точностью необходимо от 12 до 18 суток непрерывных измерений текущих навигационных параметров (ИТНП) по огибающей и фазе несущих колебаний радиосигналов НКА ГЛОНАСС по сети из почти 200 станций по всему миру.

Очевидно, что создать подобную сеть станций в составе космического комплекса и комплекса функциональных дополнений ГЛОНАСС не представляется возможным по организационным и финансовым причинам. В связи с этим чрезвычайно актуальным является задача проектирования сети станций сбора измерений (ССИ), которая обеспечит достижение требуемой точности оценки ЭВИ при минимальном количестве станций.

Методика построения сети станций сбора измерений ГЛОНАСС

Основной задачей сети ССИ является формирование массива ИТНП, необходимого для высокоточного определения ЭВИ. В связи с этим география размещения ССИ должна выбираться исходя из возможности достижения требуемых точностных характеристик с учетом ряда очевидных ограничений:

- ССИ должна располагаться в зоне слабой тектонической активности на суше в месте, обеспечивающем уверенный прием и формирование ИТНП радиосигналов НКА;
- место размещения ССИ должно быть подключено к надежным высокоскоростным каналам передачи данных;
- размещение ССИ за рубежом должно подкрепляться соответствующей нормативной базой.

Одновременный учет указанных факторов затрудняет процесс проектирования топологии сети ССИ, поэтому целесообразно разделить его на два этапа:

- 1) определение параметров сети исходя из требований решения целевой задачи;
- 2) уточнение топологии сети с учетом ограничений.

В основе определения ЭВИ лежит принцип кратности ИТНП по конкретному НКА, который заключается в том, что радиосигналы одного НКА одновременно принимаются несколькими ССИ. Задачей первого этапа проектирования является определение минимально необходимой кратности покрытия всего множества подспутниковых точек на поверхности Земли.

На втором этапе исходя из требований обеспечения заданной кратности определяется количество реально необходимых ССИ. При этом учитывается, что в регионах с нестабильной политической обстановкой и в районе Тихого океана невозможно установить ССИ в интересующих местах, а альтернативные варианты размещения могут потребовать дополнительных станций.

Общеизвестным условием решения системы уравнений связи между ИТНП и оцениваемыми параметрами ЭВИ НКА является превышение количества измерений над числом неизвестных. Количество ССИ наряду с числом НКА в орбитальной группировке и длительностью интервала наблюдения, который может составлять от 12 до 200 ч, определяет число уравнений. Кроме того, от количества ССИ зависит и число оцениваемых параметров, поскольку в них входят параметры фазовой неоднозначности (ПФН) ИТНП и компоненты вектора со-

стояния ССИ. Таким образом, интересующее нас число станций определяет как число уравнений, так и число неизвестных и может быть найдено исходя из условия решения системы уравнений для определения параметров ЭВИ.

При определении количества неизвестных при использовании ИТНП на временном интервале $[t_1; t_M]$ будем исходить из решения целевых задач в интересах потребителей системы ГЛОНАСС:

- в каждый момент времени необходимо оценить 17 компонентов вектора состояния НКА (9 компонентов модели солнечного давления, 6 компонентов модели орбиты, 2 компонента модели бортовой шкалы времени). В случае использования НКА одного типа параметры светового давления могут приниматься общими для всей группировки, однако на практике [4] для достижения высоких точностей оценки ЭВИ их оценивают отдельно для каждого НКА;
- в каждый момент времени производится оценка компонентов вектора состояния для орбитальной группировки из N НКА с использованием ИТНП по огибающей и фазе несущих колебаний во всех диапазонах частот;
- в каждый момент времени необходимо оценить 2 компонента вектора состояния измерительной станции (вертикальная тропосферная задержка и уход шкалы времени ССИ относительно системной шкалы времени);
- количество оцениваемых ПФН ИТНП по фазе несущих колебаний радиосигналов НКА для одной ССИ на заданном временном интервале определяется эмпирической зависимостью $W(\alpha; \mathbf{X}; t_1 \dots t_M; N)$ от вектора координат ССИ $\mathbf{X}$ и угла маски α направления из места расположения ССИ на НКА;
- в каждый момент времени количество НКА, радиосигналы которых принимает ССИ с координатами $\mathbf{X}$ в момент времени t , определяется зависимостью $L(\alpha; \mathbf{X}; t; N)$.

С учетом вышесказанного необходимое условие решения задачи определения параметров ЭВИ может быть представлено следующим неравенством:

$$\underbrace{N \cdot 17 \cdot M}_{\text{параметры ЭВИ НКА}} + \sum_{i=1}^K \left[\underbrace{W(\alpha; \mathbf{X}_i; t_1 \dots t_M; N)}_{\text{параметры фазовой неоднозначности}} + \underbrace{2M}_{\text{параметры станции}} \right] \leq \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^M L_i(\alpha; \mathbf{X}_i; t_j; N) D, \quad (1)$$

где M – количество моментов времени, используемых для определения ЭВИ; K – количество ССИ; D – количество ИТНП в каждый момент времени (для орбитальной группировки НКА «Глонасс-М» $D = 4$, поскольку ИТНП формируются по радиосигналам в диапазонах L1 и L2; для орбитальной группировки НКА «Глонасс-К» $D = 6$, так как ИТНП формируются по радиосигналам в диапазонах L1, L2, L3).

Число оцениваемых ПФН для каждой ССИ определяется количеством видимых НКА, временем их непрерывного пребывания в зоне видимости ССИ и вероятностью сбоя в слежении за радиосигналами данного НКА в течение интервала его непрерывного пребывания в зоне видимости данной ССИ:

$$W(\alpha; \mathbf{X}_i; t_1 \dots t_M; N) = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \begin{cases} \frac{D}{2}, & \text{если } Um_{ijk} \geq \alpha \text{ и } Um_{ijk-1} < \alpha, \\ 1, & \text{если } P_j^k \geq 0.999, \\ 0, & \text{во всех остальных случаях,} \end{cases} \quad (2)$$

где $Um_{ijk} = Um(X_i, Z_j(t_k))$ – значение угла места вектора из точки расположения ССИ с координатами $\mathbf{X}_i$ в направлении НКА с координатами $\mathbf{Z}_j$ в момент времени t_k ; P_j^k – совместная вероятность возникновения сбоя в работе схем слежения цифровых каналов приемного устройства ССИ за радиосигналами одного НКА во всех диапазонах частот в ходе текущего сеанса его наблюдения.

Величина P_j^k определяется в каждый момент времени по рекуррентной формуле:

$$P_j^k = \begin{cases} 1 - (1 - P_j^{k-1})(1 - P_j(Um_{ijk}))^{\frac{D}{2}}, & \text{если } Um_{ijk} \geq \alpha, \\ 0, & P_j^k \geq 0.9999998, \\ & \text{во всех остальных случаях,} \end{cases} \quad (3)$$

где $P_j(Um_{ijk})$ – вероятность сбоя в работе схемы слежения за одним из радиосигналов j -го НКА в случае приема его радиосигналов с любого направления под углом места Um_{ijk} .

Совместная вероятность возникновения сбоя в каждый последующий момент времени пребывания НКА в зоне видимости ССИ оценивается на основе совместной вероятности возникновения сбоя за весь предшествующий интервал наблюдения и вероятности возникновения сбоя. Пороговое значения вероятности наступления сбоя задается при проектировании сети на основе вероятности сбоя и данных о периоде повторяемости сбоев. Исходя из требований к надежности навигационных определений, предъявляемых, например, гражданской авиацией, в качестве порогового значения P можно выбрать величину 0.9999998. В случае если P_j^k превышает пороговое значение, то будем считать, что за прошедший интервал наблюдения произошел сбой в работе схемы слежения за фазой несущей, в выражении (2) количество оцениваемых ПФН увеличивается на 1.

В ряде случаев вероятность сбоя в работе схемы слежения задается априорно, на практике же значение вероятности сбоя при слежении за радиосигналами НКА не должно превышать 1-2 %. Однако в силу большого количества различных факторов как естественного, так и искусственного происхождения в реальных условиях на пункте размещения ССИ вероятность сбоя может отличаться от заданного значения как в большую, так и в меньшую сторону.

В современных условиях очень сложно соблюсти баланс между требованиями к надежности сопровождения радиосигналов и передачи данных, низкой стоимостью создания и поддержания в технической и эксплуатационной готов-

ности ССИ. Существует большое количество пунктов наблюдения, которые обладают надежными линиями передачи данных и квалифицированным персоналом, имеющим большой опыт работы в составе сложных измерительных систем. Однако в большинстве случаев подобные пункты расположены в непосредственной близости от крупных городов, в которых на первый план выходят трудности с обеспечением электромагнитной совместимости аппаратуры ССИ и других средств.

В качестве эффективного средства снижения влияния на качество ИТНП локальных условий приема радиосигналов можно использовать минимально допустимое значение угла места НКА относительно ССИ, при котором ИТНП могут использоваться для формирования ЭВИ.

Опыт эксплуатации сети ССИ системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ) [4], включающей 19 станций на территории Российской Федерации и 6 за рубежом, позволяет оценить реальные значения вероятности сбоев в работе следящих систем ССИ. В табл. 1 приведены результаты оценки вероятности сбоев в работе ССИ с наилучшими и наихудшими показателями, а также среднее значение по всем станциям сети при приеме радиосигналов НКА ГЛОНАСС и GPS при различных значениях минимального угла места α в течение первых трех месяцев 2013 г. Привлечение измерений по радиосигналам НКА GPS позволяет более чем в 2 раза увеличить размер выборки для оценки статистических характеристик для отсчетов ИТНП, следующих с частотой 1 Гц.

Таблица 1

Вероятность сбоя $P_j(\alpha)$ (%)

Характеристики условий приема	Минимальный угол места, град					
	5	10	15	20	25	30
Худший случай	8.70	6.85	5.77	4.68	3.51	2.85
Лучший случай	1.35	0.25	0.16	0.13	0.11	0.09
Средний показатель по сети	3.38	1.98	1.57	1.33	1.14	0.99

Поскольку количество НКА, находящихся в зоне радиовидимости ССИ, постоянно изменяется в достаточно широких пределах, то для поиска минимально необходимого количества ССИ представляется целесообразным заменить в выражении (1) многопараметрическую функцию $L(\alpha; \mathbf{X}; t; N)$ на табулированное значение $L'(\alpha)$, которое будет определять среднее значение количества видимых НКА при любом местоположении ССИ в пределах временного интервала $[t_1; t_M]$ при заданном минимальном значении угла места α . При расчете значений L' учитывалось орбитальное построение ГЛОНАСС, предполагающее полную повторяемость трасс движения НКА через 17 витков (7 суток 23 часа 27 минут 27 секунд).

В табл. 2 приведены значения количества видимых НКА для орбитальной группировки из $N = 24$ аппаратов при различных значениях минимально допустимого угла места для ССИ, расположенных в высоких широтах и на экваторе, а также среднее количество НКА в зоне радиовидимости сети станций, равномерно расположенных на поверхности земного шара с шагом 1° по широте.

Т а б л и ц а 2

Среднее количество видимых НКА, (шт.)

Название пункта	Минимальное значение угла места, град				
	10	15	20	25	30
Пункт на широте 70°	8.3	7.5	6.7	5.9	5.1
Пункт на экваторе	6.2	5.4	4.6	3.8	3.0
Среднее значение по сети $L'(\alpha)$	7.2	6.5	5.7	4.9	4.0

Т а б л и ц а 3

Отношение времени нахождения НКА в зоне радиовидимости ССИ к длительности витка

Название пункта	Минимальное значение угла места, град				
	10	15	20	25	30
Пункт на широте 70°	0.34	0.31	0.28	0.25	0.21
Пункт на экваторе	0.25	0.23	0.19	0.16	0.12
Среднее значение по сети $\delta(\alpha)$	0.30	0.27	0.24	0.21	0.17

Получим упрощенное выражение для определения количества сбоев на одном витке обращения НКА. Для этого вероятность P возникновения хотя бы одного сбоя по одному типу ИТНП для m дискретных моментов времени представим как

$$P = 1 - (1 - P(\alpha))^m,$$

где $P(\alpha)$ – вероятность сбоя в один момент времени, численно равная средней по сети ССИ вероятности сбоя.

Здесь предполагается невозможность одновременного возникновения двух и более сбоев, а также независимость сбоев в разные моменты. Отсюда получаем следующее выражение для определения числа m дискретных моментов времени, соответствующего вероятностям $P(\alpha)$ и P :

$$m = \frac{\lg(1 - P)}{\lg(1 - P(\alpha))}. \quad (4)$$

Используя (4) и зависимость $\delta(\alpha)$, можно получить упрощенное выражение для определения количества сбоев R на одном витке обращения НКА при частоте следования отсчетов 1 Гц для всех типов ИТНП

$$R = \frac{1}{m} \frac{D}{2} \delta(\alpha) T = \frac{D}{2} \delta(\alpha) T \frac{\lg(1 - P(\alpha))}{\lg(1 - P)}, \quad (5)$$

где $T = 40544$ – количество секундных отсчетов ИТНП на одном витке; $P = 0.9999998$ (заданное значение); $\delta(\alpha)T$ – интервал наблюдения НКА с одной ССИ на одном витке.

Выражение (3) позволяет упростить выражение (2) для оценки ПФН $W(\alpha; \mathbf{X}; t_1 \dots t_M; N)$ на интервале полной повторяемости орбиты НКА ГЛОНАСС (17 витков) при частоте следования отсчетов 1 Гц

$$W(\alpha; \mathbf{X}; t_1 \dots t_M; N) = 17N \frac{D}{2} \left[1 + \delta(\alpha) T \frac{\lg(1-P(\alpha))}{\lg(1-P)} \right]. \quad (6)$$

С учетом полученных зависимостей формула (1) может быть записана

$$17N17T + K \left[17N \frac{D}{2} \left[1 + \delta(\alpha) T \frac{\lg(1-P(\alpha))}{\lg(1-P)} \right] + 2 \cdot 17 \cdot T \right] \leq K17 \cdot TL'(\alpha)D. \quad (7)$$

Из (7) получаем выражение для определения количества ССИ

$$K = INT \left[\frac{N \cdot 17}{L'(\alpha) \cdot D - N \cdot \frac{D}{2} \cdot \left[\frac{1}{T} + \delta(\alpha) \frac{\lg(1-P(\alpha))}{\lg(1-P)} \right] - 2} \right]. \quad (8)$$

где $INT()$ – функция округления до ближайшего целого.

В настоящее время в орбитальной группировке ГЛОНАСС функционируют $N = 24$ НКА, однако в рамках федеральной целевой программы планируется увеличить количество НКА в орбитальной группировке до $N=30$ к 2020 г. Кроме того, на смену действующим НКА «Глонасс-М» должны прийти новые НКА «Глонасс-К», предоставляющие услуги в трех диапазонах частот, и к 2020 г. их в составе группировки будет 22 [5].

Указанные обстоятельства требуют анализа трех вариантов построения орбитальной группировки (24 НКА «Глонасс-М», смешанная группировка из 30 НКА «Глонасс-М» и «Глонасс-К», 30 НКА «Глонасс-К») в целях определения максимальных требований к параметрам сети. При средней вероятности сбоя в работе станции 1.5% для получения устойчивого решения задачи оценки ЭВИ для орбитальной группировки из 24 НКА необходимо глобально распределить сеть из 19 ССИ, а для смешанной группировки из 30 НКА при пропорциональном увеличении табулированных значений $L'(\alpha)$, $\delta(\alpha)$ и $P_j(\alpha)$ – сеть из 14 ССИ. Полученные результаты (табл. 4) позволяют сделать вывод о том, что для наблюдения группировки из 24 НКА сеть ССИ должна обеспечить 5-кратное покрытие территории земного шара, а для наблюдения группировки из 30 НКА достаточно 4-кратного покрытия.

Таблица 4

Количество ССИ в глобальной сети

Параметры орбитальной группировки	Минимальное значение угла места, град				
	10	15	20	25	30
24 НКА	15	17	19	23	29
Смешанная группировка из 30 НКА	11	12	14	16	20
30 НКА	10	11	13	15	18

На рис. 1 приведены варианты построения глобальных сетей из 21 и 27 ССИ, обеспечивающие соответственно 4- и 5-кратное покрытие подспутниковых точек на поверхности Земли с учетом фактической возможности размещения.

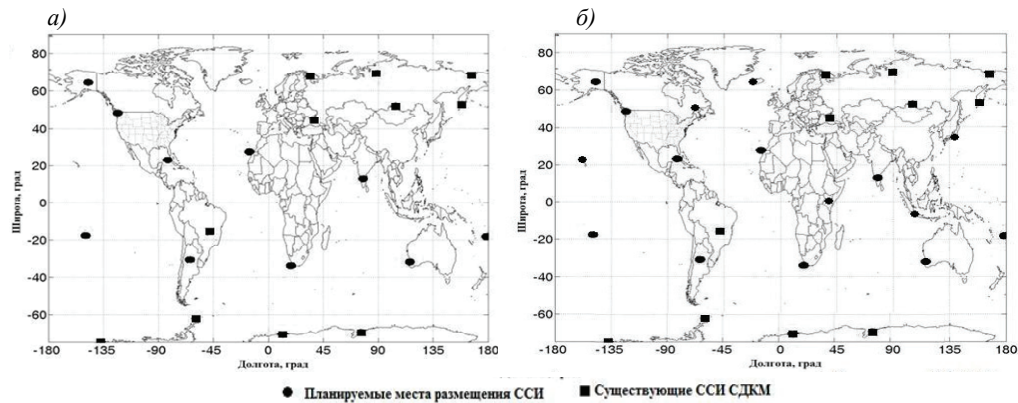


Рис. 1. Глобальная сеть ССИ: 4-кратное покрытие (а), 5-кратное покрытие (б)

Экспериментальная оценка характеристик сетей

Наличие в глобальном масштабе большого количества действующих измерительных станций IGS, которые осуществляют оценку ИТНП радиосигналов НКА ГЛОНАСС и GPS, позволяет проверить погрешность прогнозирования ЭВИ за счет использования реальных измерений станций, расположенных либо в местах предполагаемого размещения ССИ, либо в том же регионе земного шара.

В соответствии с определенными вариантами построения сетей с 4- и 5-кратным покрытием были сформированы две конфигурации сетей (рис. 2). Для 4-кратного покрытия были привлечены 10 ССИ из состава СДКМ и 11 станций IGS [4, 7].

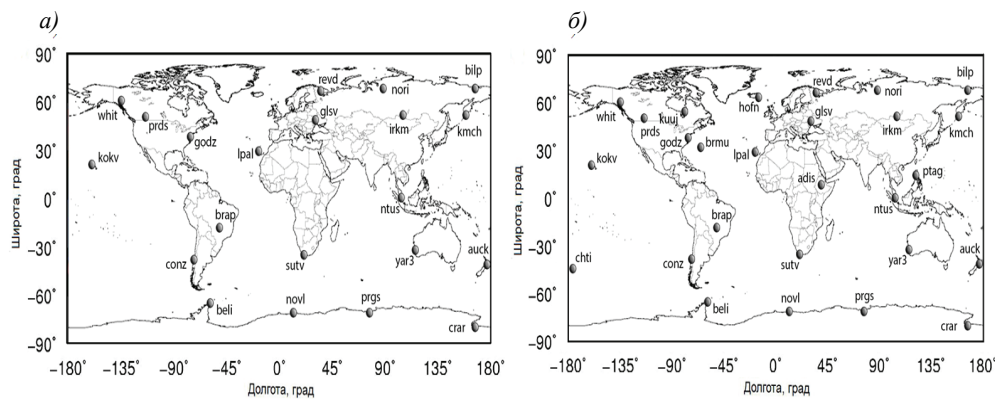


Рис. 2. Глобальная сеть из реально действующих станций:
4-кратное покрытие (а), 5-кратное покрытие (б)

Станции СДКМ в Билибино (bilp), Петропавловске-Камчатском (kmch), Норильске (nogi), Иркутске (irkm), Геленджике (glsv) и Ловозере (revd) развернуты в 2005-2010 гг., в 2010 ССИ СДКМ были установлены на станциях российской антарктической экспедиции «Беллинсгаузен» (beli) и «Новолазаревская» (novo), в 2011 г. – на станции «Прогресс» (prgs). Первая станция в Латинской Америке в г. Бразилиа (bgar) введена в эксплуатацию в феврале 2013 г.

Дополнительные станции IGS в Вайтхорсе (Канада) (whit), Калгари (Канада) (prds), Ваймеа (США) (kokv), Гринбелте (США) (godz), Рок де лос Мучачос (Испания) (lral), Концепсьоне (Чили) (conz), Суберланде (ЮАР) (sutv), Сингапуре (Сингапур) (ntus), Донгаре (Австралия) (uar3) и Вангапараоа Пенинсула (Новая Зеландия) (auck) позволили сформировать прототип глобальной сети, (см. рис. 1, а).

Пятикратное покрытие было обеспечено путем привлечения к предыдущим станциям СДКМ и IGS дополнительно 6 станций IGS в Кууджиуарапик (Канада) (kuuj), на Бермудах (Великобритания) (brmu), в Хоэфн (Исландия) (hofn), Адис Абебе (Эфиопия) (adis), Тигуик Сити (Филиппины) (ptag) и Варекаури (Новая Зеландия) (chti).

С помощью указанных наборов станции были сформированы массивы ИТНП для радиосигналов НКА ГЛОНАСС и GPS на временном интервале с 0:00 26 декабря 2012 г. до 23:39 28 декабря 2012 г. (3 суток). Данный массив ИТНП был использован для прогноза ЭВИ на последующие 24 ч, т.е. на 29 декабря 2012 г.

Оценка эквивалентной погрешности псевдодальности, вызванная ошибками прогнозирования эфемерид ΔS_{Σ} , ЧВП $\Delta S_{\text{ЧВП}}$ и ЭВИ в целом $\Delta S_{\text{ЭВИ}}$, проводилась с использованием следующих выражений [8]:

$$\Delta S_{\Sigma} = \sqrt{[0.98 \cdot \Delta R]^2 + 0.14^2 \cdot [\Delta L^2 + \Delta N^2]}, \quad (7)$$

$$\Delta S_{\text{ЧВП}} = |c \cdot \Delta T|, \quad (8)$$

$$\Delta S_{\text{ЭВИ}} = \sqrt{[0.98 \cdot \Delta R - c \cdot \Delta T]^2 + 0.14^2 \cdot [\Delta L^2 + \Delta N^2]}, \quad (9)$$

где ΔR , ΔL , ΔN – фактическое отклонение эфемерид по радиусу, вдоль орбиты и в боковом направлении от окончательных (final precise ephemerides) апостериорных значений, полученных IGS; ΔT – фактическое отклонение бортовой шкалы времени НКА от апостериорных значений, полученных IGS (для сохранения размерности погрешность бортовой шкалы времени умножается на скорость света c). Коэффициенты 0.98 и 0.14 передают среднее влияние ошибок положения НКА на погрешность псевдодальности [8, 9].

На рис. 3 приведены результаты оценки среднеквадратической погрешности (СКП) прогнозирования эфемерид, отклонения показаний бортовой шкалы времени и ЭВИ в целом для двух конфигураций сетей станций отдельно для орбитальных группировок ГЛОНАСС и GPS. В каждый момент времени СКП оценивается по выборкам из 24 значений ошибок для ГЛОНАСС и 32 значений ошибок для GPS, рассчитанным с помощью выражений (7)–(9).

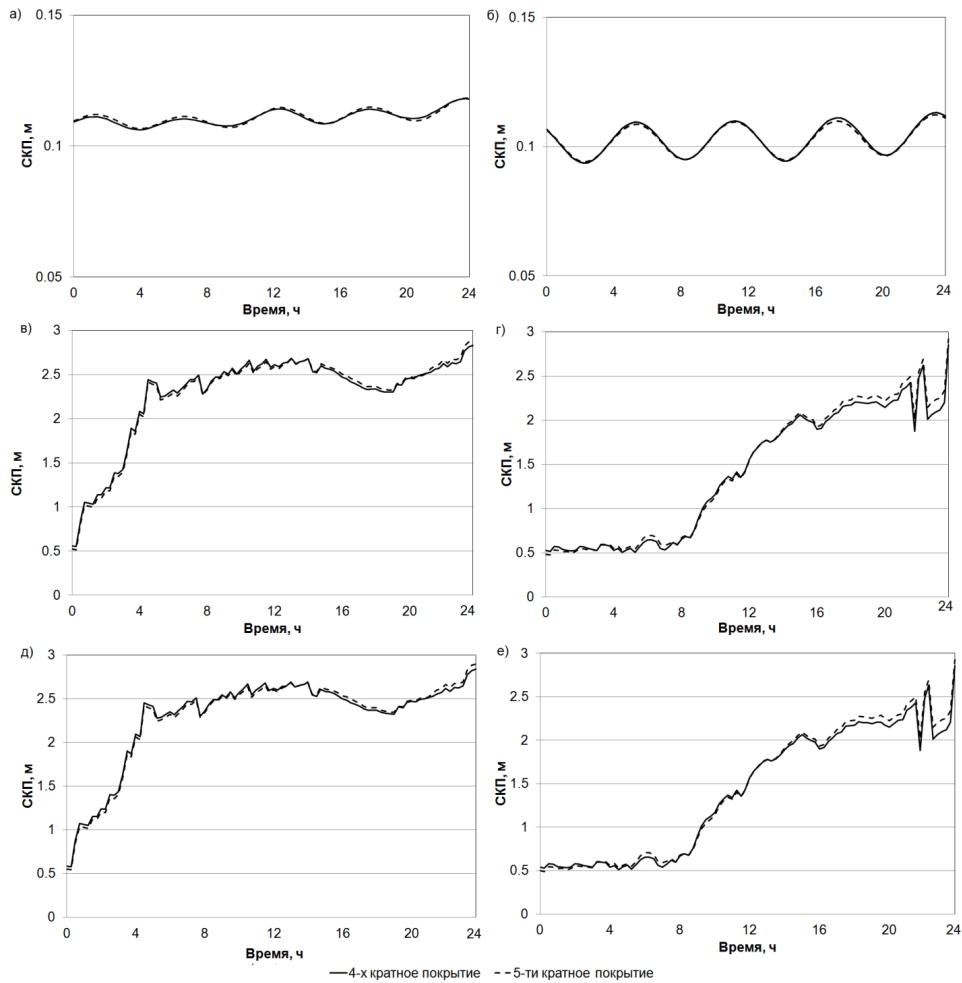


Рис. 3. Среднеквадратические погрешности прогнозирования эквивалентных погрешностей псевдодальности за счет ЭВИ НКА ГЛОНАСС (а, в, д) и GPS (б, г, е): эфемериды (а, б); ЧВП (в, г); ЭВИ (д, е)

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что погрешность прогнозирования эфемерид на длительные интервалы времени (6 и более часов) может быть понижена с существующего уровня в 1 м при использовании реализованной на данный момент конфигурации СДКМ до 0.1 м. Основным же фактором, определяющим точности ЭВИ, является погрешность ЧВП, которая требует оперативного обновления с периодичностью в несколько минут. При этом проигрыш в точности прогнозирования ЭВИ при использовании 4-кратного покрытия составляет менее 0.5% в сравнении с 5-кратным НКА ГЛОНАСС и GPS.

Заключение

Проведенные исследования показывают возможность существенного повышения точности прогнозирования ЭВИ при использовании глобальной сети из 22 ССИ, обеспечивающих 4-кратное покрытие. Повышение кратности покрытия позволяет уменьшить СКП прогнозирования ЭВИ, однако увеличение количе-

ства станций почти на 30% при создании сети с 5-кратным покрытием дает выигрыш по точности около 0.5%.

Необходимо также отметить, что экспериментальные оценки погрешности ЭВИ определяются в основном погрешностью прогнозирования показаний бортовой шкалы времени НКА, поэтому на современном этапе развития системы ГЛОНАСС особую актуальность приобретает задача совершенствования модели прогнозирования показаний бортового стандарта частоты НКА.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Радионавигационный** план Российской Федерации.- ОАО «НТЦ «Интернавигация».- 2011.- 95 С.
2. **Ревнивых, С.Г.** Основные итоги выполнения федеральной целевой программы «Глобальная навигационная система», цели и задачи новой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 гг.» / С.Г.Ревнивых [и др.] // 2-я Международная научно-техническая конф. «Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека».- Железнодорожск, 2012. - С. 24-26.
3. **M. Caissy, L. Agrotis, G. Weber, M. Hernandez-Pajares, U. Hugentobler.** The International GNSS Real-Time Service. GPS World. vol. 23. № 6, 2012. P. 52 - 59.
4. **Bernese** GPS software. Edited by U. Hugentobler, R. Dach, P. Fridez. Astronomical Institute University of Bern. 2005. - 392 p.
5. **Косенко, В.Е.** Залог стабильности системы / В.Е.Косенко, В.Д.Звонарь, С.В.Сторожев // Информационные спутниковые системы.- 2012.-№ 14.- С. 13.
6. **www.sdcn.ru**
7. **www.igs.org/network/netindex.html**
8. **Bradford W. Parkinson, James J. Spilker.** Global Positioning System: Theory and Applications (volume One). American Institute of Aeronautics and Astronautics. Washington. 1996 – 781 P.
9. **Heng L., Gao G., Walter T., Edge P.** Statistical Characterization of GLONASS Broadcast Ephemeris Error. Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, OR, September 20-23, 2011. - P. 3109 - 3117.

Abstract. Global measuring station network requirements analysis had been done. Network design methodology is proposed and its performance experimental study for precise navigation and timing service for GLONASS users are presented. Recommendations regarding GLONASS measuring facilities development has been provided.

Key words: GLONASS, GNSS, accuracy, measuring facility

Материал поступил 18.04.13