

УДК 621.396.98:629.783

НАВИГАЦИЯ ПО СИГНАЛАМ ГЛОНАСС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХМИНИАТЮРНОГО РУБИДИЕВОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ

В. Б. Пудловский

ФГУП «ВНИИФТРИ» Менделеево, Московской обл.
pudlovskiy@vniiftri.ru

В сложных условиях приёма сигналов системы ГЛОНАСС, например, таких как городские каньоны, снижается доступность наблюдения четырёх навигационных космических аппаратов (НКА), необходимых для решения навигационной задачи. Для обеспечения навигации по сигналам только трёх НКА требуется дополнительная информация о точной шкале времени приёмника и/или высоте объекта.

В настоящее время ФГУП «ВНИИФТРИ» разработало сверхминиатюрный рубидиевый стандарт частоты (СРСЧ) на основе эффекта когерентного пленения населенностей. СРСЧ имеет нестабильность частоты не хуже 10^{-11} и объём до нескольких десятков кубических сантиметров, что позволяет интегрировать этот стандарт в конструкцию навигационной аппаратуры потребителя (НАП).

С целью оценки возможности определения координат и высоты в НАП при использовании сигналов только трёх НКА проведено математическое моделирование сеансов навигации с прогнозом шкалы времени с использованием характеристик стабильности частоты реальных опорных генераторов: кварцевого - типа ГК-99 и СРСЧ. Полученные по результатам моделирования оценки погрешностей координат и высоты для стационарного и динамичного объектов показали преимущества использования СРСЧ для навигации по сигналам только трёх НКА в течение не менее 30 минут.

Ключевые слова: навигационная аппаратура, глобальные навигационные спутниковые системы, сверхминиатюрный рубидиевый стандарт частоты, погрешность координат

NAVIGATION BY GLONASS SIGNALS USING THE SUBMINIATURE RUBIDIUM FREQUENCY STANDARD

V.B. Pudlovskiy

FSUE "VNIIFTRI" Moscow region, Mendeleevo,
pudlovskiy@vniiftri.ru

In difficult conditions for receiving signals from the GLONASS system, for example, such as urban canyons, the availability of measurements of four navigation satellites (NS), necessary for solving a navigation task, is reduced. To provide navigation on the signals of only three NS, additional information is required on the exact time scale of the receiver and / or the height of the object.

Currently, FSUE "VNIIFTRI" has developed a subminiature rubidium frequency standard (SRFC) based on the effect of coherent population trapping. SRFC has frequency instability no worse than 10^{-11} and a volume of up to several tens of cubic centimeters, which allows you to integrate this standard into the design of navigation receiver (NR).

In order to assess the possibility of determining the coordinates and altitude in the NR using the signals of only three of the NS, mathematical modeling of navigation sessions was carried out with a time scale forecast using the frequency stability characteristics of real reference oscillators: quartz - type GK-99 and SRFS. The results of modeling estimates of coordinate and altitude errors for stationary and dynamic objects showed the advantages of using the SRFS to navigate the signals of only three NS for at least 30 minutes.

Key words: navigation receiver, global navigation satellite systems, subminiature rubidium frequency standard, coordinate error

1. Введение

Система ГЛОНАСС остается основной координатно-временного и навигационного обеспечения всех отечественных потребителей. Для использования сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) необходимо, чтобы навигационная аппаратура потребителя (НАП) располагала измерениями от четырех и более навигационных космических аппаратов (НКА) для определения координат и высоты объекта, а также для оценки поправки шкале времени приемника (ШВП) [1]. Режим абсолютного позиционирования по сигналам НКА для объекта в движении требует регулярной оценки этой поправки ШВП по отношению к шкале времени ГНСС из-за низкой долговременной, а часто и кратковременной, стабильности частоты кварцевого опорного генератора (КОГ), встроенного в НАП [1].

В условиях ухудшения условий наблюдения сигналов НКА, таких как городские каньоны, как правило, доступны менее четырех НКА одной ГНСС. Для обеспечения требуемой надежности навигационных определений в таких условиях актуально привлечение дополнительной информации, например, о точной шкале времени приемника и/или высоте потребителя.

В настоящее время технологически развитые страны мира проводят разработку малогабаритных стандартов частоты, имеющих объем до нескольких десятков кубических сантиметров, с точностными характеристиками, сравнимыми с уже существующими цезиевыми и рубидиевыми стандартами частоты. Наиболее перспективным вариантом сверхминиатюрного рубидиевого стандарта частоты (СРСЧ) является стандарт частоты на основе эффекта когерентного пленения населенностей (КПН). Несмотря на большое количество фирм, разрабатывающих такие миниатюрные стандарты, до коммерческого результата доведены изделия фирм Microsemi (США) и Accubeat (Израиль) [2, 3].

В 2019 г. ФГУП «ВНИИФТРИ» разработало и проводит испытания отечественного СРСЧ на основе КПН [4]. Габариты СРСЧ позволяют использовать их вместо КОГ в составе НАП различного назначения.

Высокая стабильность частоты квантового стандарта делает хорошо предсказуемой смещение ШВП и, таким образом, для определения координат и высоты потребителя требуются только три НКА. В зарубежной литературе преимущества прогноза ШВП для повышения качества навигации по сигналам ГНСС обсуждаются уже давно [5] и продолжают в настоящее время в связи с развитием сверхминиатюрных стандартов частоты [6].

Обзор современной отечественной литературы по использованию стабильных ОГ в НАП для поддержки навигации в условиях наблюдения трёх НКА показал отсутствие должного внимания этой актуальной теме.

С целью оценки возможности определения координат и высоты в НАП при использовании сигналов только трёх НКА проведено математическое моделирование сеансов навигации с прогнозом ШВП с использованием характеристик стабильности частоты реальных опорных генераторов (ОГ): КОГ типа ГК-99 (АО «Морион») и СРСЧ, разработанного во ФГУП «ВНИИФТРИ».

2. Типовой алгоритм решения навигационной задачи

Как известно, целью решения навигационной задачи (НЗ) в НАП является определение вектора состояния (ВС) потребителя по результатам измерения псевдодальностей \hat{R}_j не менее чем до четырех НКА ($j=1\dots n, n \geq 4$) [1]. Как правило, ВС включает координаты и высоту антенны приемника \mathbf{x} , а также оценку смещения ШВП b . Векторная форма записи этих измерений после линеаризации в окрестности истинного значения ВС имеет следующий вид [1]:

$$\boldsymbol{\rho} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta b \end{bmatrix} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (1)$$

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}} = [\Delta x \ \Delta y \ \Delta z]^T, \\ \Delta b = b - \tilde{b},$$

где $\rho_j = \hat{R}_j - \tilde{R}_j(\tilde{\mathbf{x}}) - d_j$ – результат измерения псевдодальности до j -го НКА с учетом коррекции на величину априорной дальности $\tilde{R}_j(\tilde{\mathbf{x}})$ до этого спутника и суммы различных моделируемых поправок d_j ; $\Delta \mathbf{x}$, Δb – компоненты вектора разности ВС относительно априорных значений $\tilde{\mathbf{x}}$ и \tilde{b} ;

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & g_1 & 1 \\ a_2 & b_2 & g_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_n & b_n & g_n & 1 \end{bmatrix} = [\mathbf{a} \ \mathbf{b} \ \mathbf{g} \ \mathbf{1}] \text{ – матрица частных производных}$$

псевдодальностей по элементам ВС;

$\boldsymbol{\varepsilon}$ – вектор ошибок измерений, для которого обычно определяют среднее значение $\mathbf{r} = E[\boldsymbol{\varepsilon}] = 0$ и матрицу дисперсий $\mathbf{C} = E[\boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\varepsilon}]$.

Тогда типовой для НАП алгоритм решения НЗ по алгоритму МНК для числа измерений псевдодальностей не менее 4-х имеет следующий вид [1]:

$$[\hat{x} \ \hat{b}]^T = [\tilde{x} \ \tilde{b}]^T + (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \boldsymbol{\rho}, \quad (2)$$

где $\hat{\mathbf{x}}, \hat{b}$ – оценка ВС по алгоритму МНК.

Заметим также, что через диагональные элементы q_{ii} матрицы $(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}$ часто определяют и значения геометрических факторов (ГФ), например, в следующем виде [1]:

$$GDOP = \left(\text{tr} \left[(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \right] \right)^{0,5} = (q_{11} + q_{22} + q_{33} + q_{44})^{0,5},$$

$$HDOP = (q_{11} + q_{22})^{0,5}, \quad VDOP = (q_{33})^{0,5}, \quad (3)$$

где $GDOP$ – общий ГФ решения НЗ; $HDOP$ – ГФ для положения в плоскости горизонта; $VDOP$ – ГФ для высоты в локальной системе координат.

Кроме часто используемого в НАП алгоритма оценки ВС с помощью МНК, для некоррелированных измерений псевдодальностей может быть использован алгоритм на основе расширенного фильтра Калмана (РФК). Уравнения такого фильтра можно найти в [1].

Использование в НАП высокостабильных ОГ позволяет моделировать ШВП, а не оценивать эту поправку b каждую эпоху вместе с другими компонентами ВС. При этом определение координат и высоты становится возможным по сигналам только трёх НКА, что увеличивает доступность и непрерывность навигации в сложных условиях.

3. Решение навигационной задачи с прогнозом шкалы времени потребителя

Высокостабильные генераторы, такие как СРСЧ, имеют низкие значения долговременной нестабильности частоты менее 10^{-11} , и, следовательно, позволяют с высокой точностью прогнозировать смещение ШВП b . С учетом прогноза b в (1) измерения псевдодальностей изменятся следующим образом

$$\rho = H_3 \Delta X + \tilde{b} \mathbf{1}, \quad (4),$$

где $\mathbf{1} = [1 \ 1 \ 1]^T$;

$$H_3 = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & g_1 \\ a_2 & b_2 & g_2 \\ a_3 & b_3 & g_3 \end{bmatrix} - \text{матрица частных производных дальностей по}$$

элементам x .

Тогда алгоритм решения НЗ по алгоритму МНК для трёх измерений псевдодальностей примет следующий вид:

$$\hat{x} = \tilde{x} + H_3^{-1} [\rho - \tilde{b} \mathbf{1}], \quad (5),$$

где $\hat{\mathbf{X}}$ – оценка координат и высоты по сигналам только трёх НКА.

4. Модели прогноза шкалы времени потребителя

Для эффективного прогноза поправки ШВП с целью исключения её из измерений псевдодальности нет необходимости сохранять шкалу времени ГНСС. Важнее, чтобы смещение ШВП было предсказуемым. Это означает возможность достаточно точной оценки смещения ШВП на основе наблюдений за этой шкалой в течение последнего интервала времени, когда доступны измерения не менее 4-х псевдодальностей. Если частота ОГ изменяется плавно (без скачков частоты или значительных изменений дрейфа частоты за короткие промежутки времени), то смещение ШВП может быть смоделировано с использованием аппроксимации полиномом второй степени следующего вида

$$\tilde{b}(t) = b_0 + b_1(t - t_0) + b_2(t - t_0)^2, \quad (6)$$

где b_0 , b_1 и b_2 - коэффициенты, основанные на последних оценках смещения ШВП, полученных из решения НЗ по сигналам не менее 4-х НКА одной ГНСС.

Дисперсия ошибки смещения ШВП в НАП является функцией нестабильности частоты ОГ, чувствительности к факторам окружающей среды и периода времени с момента последней оценки ШВП. Пренебрегая влиянием чувствительности к окружающей среде, дисперсия ошибки смещения ШВП

определяется как [5]:

$$\sigma_b^2(t) = \sigma_{b0}^2 + \sigma_{bs}^2(t - t_0), \quad (7)$$

где $\sigma_b^2(t)$ - дисперсия ошибки смещения ШВП в момент времени t ;

σ_{b0}^2 - дисперсия ошибки смещения ШВП в момент t_0 её последней оценки;

$\sigma_{bs}^2(t - t_0)$ - дисперсия ошибки смещения ШВП из-за нестабильности частоты ОГ.

Задавая требования к погрешности определения координат на основании (5) и с учетом (6) и (7), можно грубо оценить длительность интервала навигации по сигналам трёх НКА после окончания измерений по сигналам не менее 4-х НКА.

Точность такой оценки недостаточна, так как основана на приближенных оценках дисперсии смещения ШВП. Для более точной оценки погрешности координат и высоты с использованием прогноза ШВП для объектов различной динамики было проведено математическое моделирование сеансов навигации НАП с разными типами генераторов: КОГ типа ГК-99 и СРСЧ, разработанного во ФГУП «ВНИИФТРИ».

5. Результаты моделирования навигационной задачи

Для анализа влияния характеристик того или иного типа ОГ на погрешности определения координат и высоты с помощью двух типов алгоритмов НЗ (МНК или РФК) и в различных условиях наблюдения НКА была разработана программно-математическая модель (ПММ) на основе статистических эквивалентов корреляторов в НАП [7]. Модель была реализована на основе процедурного программирования в системе MATLAB/Octave и представляет собой совокупность взаимодействующих m -файлов (функций), каждый из которых представляет собой либо законченный блок модели, либо входит в состав такого блока.

ПММ содержит следующие основные функциональные блоки:

- модель группировки НКА ГЛОНАСС и GPS;
- блок моделирования динамики НАП, а также модель ШВП на основе экспериментальных данных измерений фазы и частоты ОГ;
- модель алгоритма НЗ с двухэтапной обработкой сигналов НКА;
- блок индикации.

Более подробно общая структура ПММ изложена в [8].

Компоновка основных блоков модели алгоритма НЗ соответствует структуре НАП, т.е. включает: модели дискриминаторов для каждого канала приема сигнала НКА, модель ШВП, а также соответствующий алгоритм решения НЗ: МНК или с использованием РФК.

При построении ПММ приняты следующие допущения: алгоритм НАП работает в режиме слежения за сигналами (режим поиска не рассматривается); не учитываются погрешности, обусловленные рефракцией в атмосфере и переотражением сигналов НКА; НКА движутся по невозмущенным орбитам.

Для моделирования НЗ на длительных интервалах использованы записи измерений фазы опорной частоты, полученные А. Шатиловым [9] при проведении экспериментальных исследований различных типов КОГ, а также экспериментальные данные измерений набега фазы СРСЧ, предоставленные специалистами ФГУП «ВНИИФТРИ». Оценки фазы на частоте 10 МГц, формируемой СРСЧ, были получены с помощью фазового компаратора Ч7-315 относительно фазы частоты стандарта водородного Ч1-1035 (АО «Время-Ч») с интервалом выборки 1 с на протяжении нескольких часов.

В ходе моделирования НЗ с помощью НАП, имеющей разные ОГ, были разработаны несколько вариантов условий наблюдения НКА, отличающихся периодами наблюдения не менее четырёх и трёх НКА разных ГНСС.

В течение сеансов НВО с числом НКА четыре и более была проведена оценка ошибок определения ШВП и дрейфа частоты ОГ, необходимая для прогноза ШВП на основе аппроксимации полиномом второй степени вида (6).

Были определены следующие исходные данные и условия моделирования: наблюдение 10 НКА (5 ГЛОНАСС и 5 GPS); использованы только открытые сигналы ГНСС (СТ и С/А коды соответственно); отношение мощности сигнал/шум для всех НКА $C/N_0 = 45$ дБГц; темп решения НЗ 0,1 с; темп моделирования схем слежения НАП 1 мс.

Значения ГФ для этих 10 НКА составили: HDOP = 0,95; VDOP = 0,9.

Отдельные результаты расчета погрешности определения координат и высоты стационарного объекта по алгоритму МНК по сигналам 3 НКА с прогнозом ШВ для КОГ и СРСЧ после наблюдения 10 НКА в течение 60 с представлены на рис. 1 и в таблице 1.

Таблица 1

Погрешности определения МНК координат и высоты

Мат. ожидание/СКО координат и высоты, м			Тип ОГ, интервал прогноза ШВП
х	у	Н	
-1,02/1,12	- 2,27/1,25	-0,43/0,71	ГК-99, 60 с
-0,18/1,42	- 0,13/0,70	- 0,17/0,68	СРСЧ, 1140 с

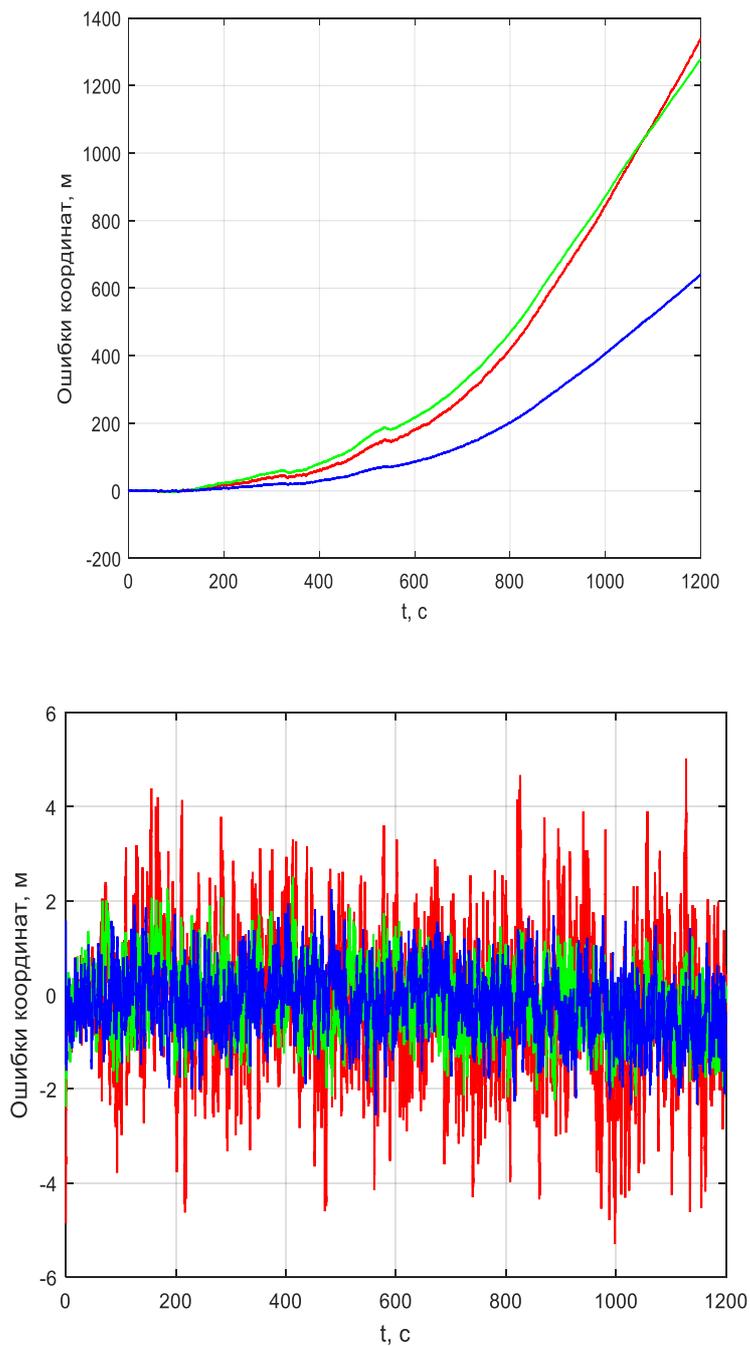


Рис. 1. Погрешности определения МНК координат и высоты (синий) по сигналам 3 НКА с прогнозом ШВП для КОГ (слева) и СРСЧ в статике

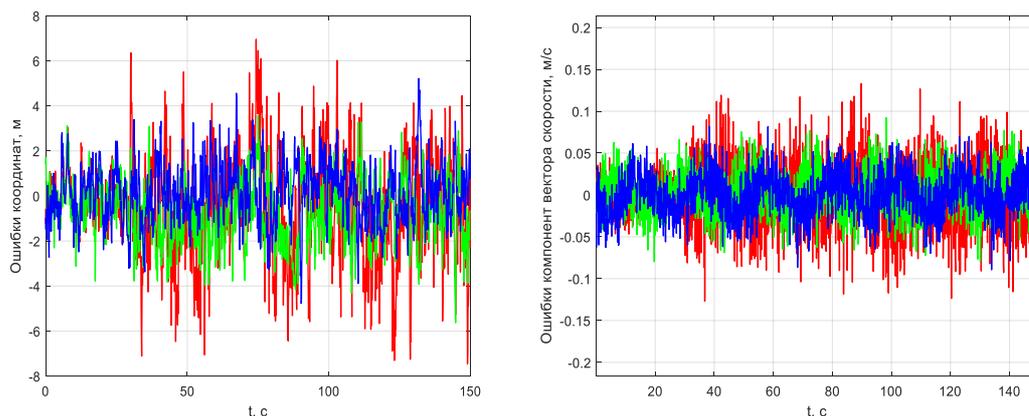


Рис. 2. Погрешности определения МНК координат, высоты (синий) и компонент вектора скорости ЛА по сигналам 3 НКА с прогнозом ШВП для СРСЧ

Некоторые сравнительные результаты расчетов погрешности определения координат, высоты и компонент вектора скорости летального аппарата (ЛА) по сигналам 3 НКА с прогнозом ШВП только для СРСЧ представлены на рис. 2 для алгоритма МНК и на рис. 3 при использовании РФК, а также сведены в таблицу 2. Показаны результаты для моделирования полёта ЛА по кругу радиусом 350 м с постоянной линейной скоростью 40 м/с. Время наблюдения 10 НКА для дальнейшего прогноза ШВП составило: 60 с – для алгоритма МНК; 100 с – для алгоритма на основе РФК.

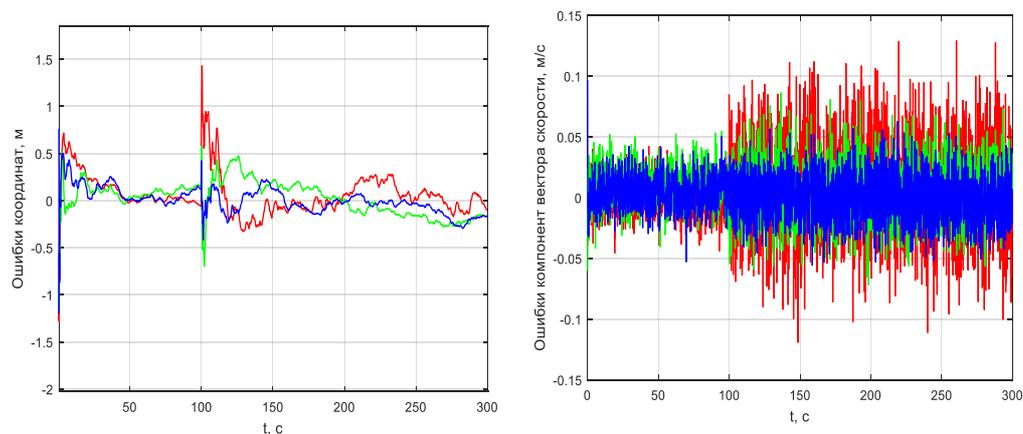


Рис. 3. Погрешности определения координат, высоты (синий) и компонент вектора скорости ЛА с использованием РФК по сигналам 3 НКА с прогнозом ШВП для СРСЧ

Погрешности определения координат и высоты (СРСЧ)

Мат. ожидание/СКО координат и высоты, м			Тип фильтра, интервал для прогноза
x	y	H	
- 0,67/2,51	- 0,88/1,42	0,19/1,31	МНК, 60 с
0,04/0,22	0,0/0,20	- 0,05/0,11	РФК, 100 с

Результаты расчетов погрешности определения координат и высоты в таблицах 1 и 2 показаны для примера и не исчерпывают всего объема данных, полученных по результатам моделирования навигационных определений с использованием реальных измерений фазы частоты ОГ двух типов: ГК-99 и СРСЧ.

6. Обсуждение результатов

С помощью разработанного программного комплекса проведено моделирование сеансов решения навигационной задачи в различных условиях наблюдения НКА (от 10 до 3) разных ГНСС и при разной динамике объекта размещения НАП с разными типами ОГ: кварцевого ГК-99 и СРСЧ.

Результаты моделирования показали возможность определения координат, высоты и компонент вектора скорости по сигналам 3-х НКА с прогнозом шкалы времени в течение *нескольких десятков минут* только для НАП, имеющей в составе СРСЧ. Использование для этого режима навигационных определений кварцевых ОГ с нестабильностью частоты хуже 10^{-7} , например ГК-99, практически невозможно.

Применение расширенного фильтра Калмана для сглаживания оценок координат и высоты позволяет снизить СКО этих оценок от 3 до 10 раз (в зависимости от динамики объекта) по сравнению с МНК при решении навигационной задачи по сигналам 3-х НКА с прогнозом шкалы времени НАП.

7. Заключение

Опорный генератор является одним из ключевых элементов практически всех типов и конструкций НАП ГНСС и во многом определяет точностные характеристики этой аппаратуры, а также других бортовых навигационных систем и комплексов как средства измерений. Чаще в НАП используют кварцевые опорные генераторы.

С помощью имитационного моделирования показаны преимущества использования в НАП сверхминиатюрного стандарта частоты по сравнению с кварцевыми опорными генераторами при определении координат, высоты и компонент вектора скорости по сигналам трех НКА.

Анализ тенденций развития зарубежных технологий миниатюрных квантовых стандартов частоты на основе КПН показывает необходимость внедрения сверхминиатюрных квантовых стандартов частоты в перспективные типы НАП вместо кварцевых опорных генераторов.

8. Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность сотрудникам ФГУП «ВНИИФТРИ» В.Г. Пальчикову и Д.А. Парёхину за любезно предоставленные экспериментальные результаты измерений набега фазы частоты СРСЧ, а также сотруднику АО «КБ «НАВИС» А.Ю. Шатилову за предоставленные записи измерений фазы опорной частоты кварцевых опорных генераторов и за полезное обсуждение этих данных.

Литература

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова – М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
2. Электронный ресурс: <http://www.accubeat.com/product-item/nano-atomic-clock-nac1> (дата обращения: 15.11.2019).
3. Электронный ресурс: <https://www.microsemi.com/product-directory/clocks-frequency-references/3824-chip-scale-atomic-clock-csac> (дата обращения: 15.11.2019).
4. В России создан сверхминиатюрный стандарт частоты для 5G и «беспилотников» / Электронный ресурс: <http://www.vniiftri.ru/ru/news-ru/item/676-v-rossii-sozdan-sverkhminiaturnyj-standart-chastoty-dlya-5g-i-bespilotnikov> (дата обращения: 15.11.2019).
5. Sturza M. GPS Navigation using Three Satellites and a Precise Clock // Navigation, V.30, № 2, Summer 1983, pp.146-156.
6. Krawinkel, Thomas: Improved GNSS navigation with chip-scale atomic clocks. München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 2018 (Veröffentlichungen der DGK, Reihe C, Dissertationen; 823), XV, 97 S. ISBN 978-3-7696-5235-2, <https://doi.org/10.15488/4684>.
7. Харисов В.Н., Пастухов А.В. Упрощенное моделирование приемников СРНС на основе введения статистически эквивалентных корреляторов // Радиотехника. 2002. №7. С. 106-112.

8. Пудловский В.Б. Методы и алгоритмы навигационных определений с использованием ретранслированных сигналов спутниковых радионавигационных систем: Диссертация канд. тех. наук: 05.12.14. МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 2009. – 259 с.
9. Shatilov A.Y. Reference Oscillator Short-Term Drift as it's Sensed by GNSS Receiver // Proceedings of the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014), Tampa, Florida, September 2014, pp. 2625-2634.