

УДК: 621.396

**ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ КООРДИНАТНО-ВРЕМЕННЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ ВИДИМОСТИ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ
СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ**

**ESTIMATION OF THE ACCURACY OF COORDINATE-TIME DEFINITIONS
OF CONSUMERS IN CONDITIONS OF LIMITED VISIBILITY
OF SPACECRAFT OF GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS**

Д-р. техн. наук Т.О. Мысливцев, канд. техн. наук С.В. Никифоров

DPhil T.O. Myslivtsev, PhD S.V. Nikiforov

ВКА им. А.Ф. Можайского

Предложен алгоритм оценки пространственных координат и текущего времени потребителя в условиях ограниченной видимости космических аппаратов (КА) глобальных навигационных систем при отсутствии априорной информации о расхождении шкалы времени приемника и системной шкалы. Для решения навигационной задачи предлагается применять алгоритмы оптимизации выполненные на основе использования методов эмпирического поиска. Произведен расчет точности оценки вектора положения потребителя в условиях видимости от одного до трех навигационных космических аппаратов при неизвестном смещении шкалы времени приемника относительно системной. Алгоритм оценки пространственных координат и текущего времени потребителя рекомендовано использовать в качестве резервного, формирующего запас устойчивости при плохой наблюдаемости вектора оцениваемых параметров, что является на данный момент актуальным.

Ключевые слова: шкала времени, метод деформируемых многогранников, эфемериды, псевдодальность, вектор положения.

An algorithm for estimating the spatial coordinates and current time of the consumer in conditions of limited visibility of spacecraft of global navigation systems in the absence of a priori information about the discrepancy between the receiver time scale and the system scale is proposed. To solve the navigation problem, optimization algorithms based on the use of empirical search methods are proposed. The calculation of the accuracy of estimating the position vector of the consumer in visibility conditions from one to three navigation spacecraft with an unknown mixing of the receiver time scale relative to the system one is made. The algorithm for estimating the spatial coordinates and the current time of the consumer is recommended to be used as a backup, forming a reserve of stability in case of poor observability of the vector of the estimated parameters, which is currently relevant.

Keywords: time scale, the method of deformable polyhedron, ephemeris, pseudorange, the position vector.

Оценка пространственных координат, вектора скорости и текущего времени (вектор состояния) потребителя осуществляется в результате обработки радиосигналов, принимаемых от

навигационных космических аппаратов (НКА). Для решения навигационной задачи применимы алгоритмы с использованием одномоментных измерений, либо на основе массива данных на-

растающего объема [1]. В условиях видимости 1–3 НКА и при неизвестном смещении шкалы времени потребителя (ШВП) рассмотренные алгоритмы не могут дать решения навигационной задачи без привлечения дополнительной информации о местоположении приемника [2, 3]. В статье проведена оценка качества решения навигационной задачи, которая осуществлена на основе использования методов численного поиска в условиях видимости от одного до трех НКА, и неизвестном смещении ШВП относительно системной ШВ. При этом не рассматриваются вопросы комплексирования аппаратуры с другими информационными системами, а использован только временной интервал накопления данных. Такой решающий алгоритм можно использовать в навигационной аппаратуре потребителя (НАП) в качестве резервного, формирующего запас устойчивости при плохой наблюдаемости вектора оцениваемых параметров.

Постановка навигационной задачи в условиях ограниченной видимости НКА

Основным содержанием навигационной задачи является определение расширенного вектора состояния потребителя, который можно представить в следующем виде:

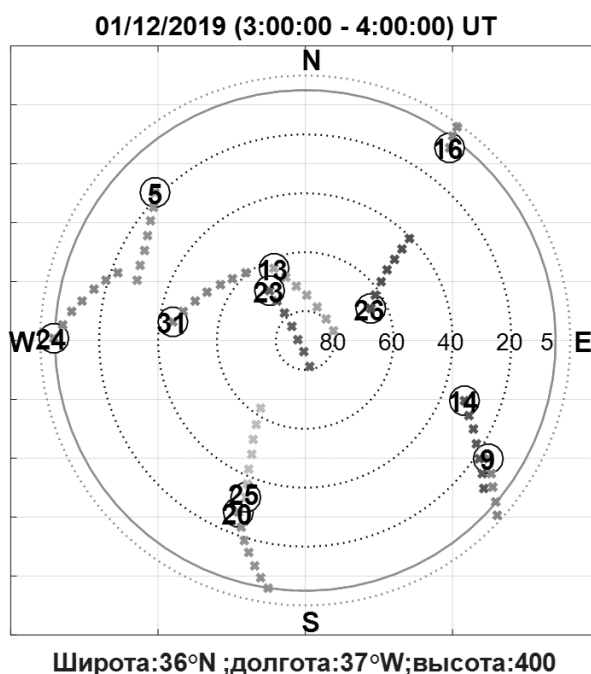
$$\bar{\mathbf{q}} = [\bar{\mathbf{q}}_x \bar{\mathbf{q}}_v]^T = [xyzBV_xV_yV_zF]^T,$$

где $\bar{\mathbf{q}}_x = [xyzB]^T$ — вектор положения потребителя; $\bar{\mathbf{q}}_v = [V_xV_yV_zF]^T$ — вектор скорости потребителя; x, y, z, V_x, V_y, V_z — координаты положения и скорости потребителя; B, F — уход, скорость ухода ШВП относительно системной шкалы времени.

Для упрощения задачи будем считать, что НАП неподвижна, поэтому для нахождения вектора положения $\bar{\mathbf{q}}_x$ потребителю достаточно проводить измерения псевдозадержек до видимых НКА.

Число НКА, участвующих в обсервации, может быть от одного до нескольких десятков. Например, при использовании ГЛОНАСС потребителю обычно видны 6–12 спутников [4].

Для примера, на рис. 1, для НАП с координатами $[36^\circ\text{N}; 37^\circ\text{W}; h=400 \text{ м}]$ (район города Алеппо) представлено изменение расположений спутников ГЛОНАСС на 1 декабря 2019 года в ин-



Широта: 36°N ; долгота: 37°W ; высота: 400

Рис. 1. Изменение расположений спутников ГЛОНАСС относительно НАП в течении 1 часа

тервале времени с 3:00:00 до 4:00:00 UT. Для моделирования использованы данные, представленные информационно-аналитическим центром координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО) [<https://www.glonass-iac.ru/>]. В центре рис. 1 находится позиция НАП, а латинскими буквами N, S, W и E указаны направления на север, юг, запад и восток относительно потребителя.

Круговыми штриховыми линиями обозначены углы места спутников ГЛОНАСС относительно НАП. Кружками отмечено расположение на небосводе НКА с соответствующими номерами в начальный момент времени наблюдения (3:00:00 UT), а крестиками представлены треки движения спутников за час.

Если при тех же условиях потребитель будет находится в условиях плотной застройки, как, например, схематично представлено на рис. 2, то в секторах видимости (заштрихованные области) НАП может принимать сигналы в течении нескольких часов от 1-го, 2-х или 3-х НКА.

Если смоделировать данную ситуацию в промежуток времени с 3:00:00 до 7:00:00 UT 1 декабря 2019 года, то потребитель условно смог бы непрерывно принимать в течении 4 часов сигналы только от спутников ГЛОНАСС с номерами 13, 24 и 25.

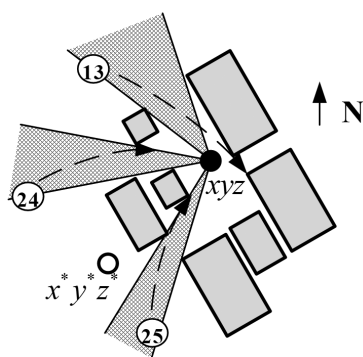


Рис. 2. Схема застройки, ограничивающей видимость спутников ГЛОНАСС

В работе будем использовать псевдодальномерный метод навигационных определений [5], так как он позволяет одновременно с оценкой местоположения вычислять отклонение ШВП от системной шкалы времени.

Уравнение модели измерения псевдодальности в i -й момент времени можно представить в виде:

$$\tilde{D}_i = D_{\text{ист } i} + \delta D_i, \quad (1)$$

где $D_{\text{ист } i}$ — истинное значение дальности от потребителя до n -го НКА; δD_i — погрешность измерения дальности до n -го НКА.

В свою очередь соотношение для погрешности дальномерных измерений δD_i в i -й момент времени можно задать выражением:

$$\delta D_i = \delta D_{i\text{CP}} + \delta D_{i\text{АП}} + c \cdot (B - b_{ni}) + \delta e_i,$$

где $\delta D_{i\text{CP}}$ — погрешности, вносимые средой распространения; $\delta D_{i\text{АП}}$ — погрешности, вносимые аппаратурой потребителя; b_{ni} — уход бортовой ШВ n -го НКА; δe_i — прочие погрешности (шум приемника, эфемеридные погрешности, ошибки из-за многолучевости и др.) измерений, как правило имеющие случайный характер; c — скорость распространения радиоволн.

Предположим, что в точке $x^* y^* z^*$ потребитель перед выключением НАП определил свои координаты, а далее занял позицию в точке xyz (см. рис. 2). В 3:00:00 UT 1 декабря 2019 года потребителю потребовалось уточнить свой вектор положения \vec{q}_x . В это время в секторах видимости НАП находятся спутники ГЛОНАСС с номерами 13, 24 и 25. Требуется, используя псевдодальномерные измерения до 1-го, 2-х или 3-х НКА,

а также информацию, передаваемую в составе навигационных сигналов, оценить местоположение потребителя $[x, y, z]$ и величину ухода ШВП относительно системной шкалы времени (B).

В условиях малоинформативной выборки для решения навигационной задачи предлагается использовать алгоритмы оптимизации, основанные на прямых численных (эмпирических) методах поиска решения, так как при использовании градиентных методов в задачах с большим числом переменных требуется получить производные в виде аналитических функций, что является порой неразрешимой задачей [6].

В методах эмпирической оптимизации при поиске минимума целевой функции используется информация только о значениях этой функции в заданных точках [6]. Некоторые из этих методов не имеют строгого теоретического обоснования и построены на основе эвристических соображений. По сравнению с градиентными методами, методы эмпирического поиска являются «более гибкими» в задачах с плохой наблюдаемостью отдельных переменных и, таким образом, вполне применимы для решения навигационной задачи в условиях ограниченной видимости НКА.

Формирование целевой функции

Вектор наблюдения в НАП представляет собой массив измерений псевдодальностей до видимых НКА в моменты времени t_i . Если имеется информация о координатах n -го НКА $X_{ni} Y_{ni} Z_{ni}$ в известные моменты времени t_i , то, зная значения псевдодальностей до видимого n -го НКА, можно отыскать такую точку в пространстве x, y, z (местоположение НАП), положение которой удовлетворяло бы истинным дальностям D_i до навигационного спутника в соответствующие моменты времени. Иными словами, зная координаты n -го НКА, значения измеренных псевдодальностей \tilde{D}_i в моменты времени t_i и уход бортовой ШВ n -го НКА b_{ni} , можно подобрать (найти в процессе оптимизации) такие координаты НАП (x, y, z) , и значение ухода ШВП от системной шкалы времени (B), при которых функционал $f(x, y, z, B)$ будет иметь минимальное значение.

Расчетное значение псевдодальностей от n -го НКА до потребителя в моменты времени t_i можно представить в виде:

$$\tilde{D}_{\text{расч}i} = \sqrt{(X_{ni} - x)^2 + (Y_{ni} - y)^2 + (Z_{ni} - z)^2} + \sqrt{c \cdot (B - b_{ni})}. \quad (2)$$

Функционал $f(x, y, z, B)$ определяется как сумма отклонений рассчитанных значений псевдодальностей $\tilde{D}_{\text{расч}i}$ (2) и псевдодальностей \tilde{D}_i , измеренных НАП, в моменты времени t_i (1).

$$f(x, y, z, B) = \sum_{i=1}^N (\tilde{D}_{\text{расч}i} - \tilde{D}_i)^2,$$

где N — количество измерений.

Для решения навигационной задачи НАП требуется начальная точка поиска, в качестве которой можно брать значение последнего места положения потребителя $x^* y^* z^*$ или центр Земли. Чем точнее предсказана начальная точка поиска, тем меньше времени потребуется потребителю для нахождения местоположения $[x, y, z]$ и оценки значения ухода ШВП от системной шкалы времени.

Процесс поиска минимума функционала $f(x, y, z, B)$ предлагается осуществлять методом деформируемых многогранников (метод Нелдера-Мида) [7], который эффективен при оптимизации нескольких переменных, и не использует производных функции (градиентов).

Блок схема навигационного алгоритма оценки пространственных координат и текущего времени потребителя в условиях ограниченной видимости НКА при использовании метода деформируемых многогранников представлена на рис. 3.

В НАП формирование измеренной псевдодальности основано на измерении момента приема заданной фазы дальномерного кода и расчете ее запаздывания относительно момента формирования той же фазы дальномерного кода на борту НКА, информация о котором извлекается из навигационного сообщения. Определенная таким образом псевдодальность отличается от той, которая постулируется формулой (1), что обусловлено рядом физических и технических факторов. Отклонение измеренной псевдодальности от расчетной (δe_i) — погрешности определения псевдодальности, предельно достижимый бюджет которых представлен в табл. 1 [1, 8].

Полагается, что все составляющие погрешностей являются некоррелированными между собой случайными величинами с гауссовским законом распределения, имеющими нулевые математическое ожидание (МО) и дисперсию $\sigma_{\delta D}^2$. Поэтому дисперсия общей ошибки определяется как сумма дисперсий отдельных составляющих. Приводимые в табл. 1 значения отдельных

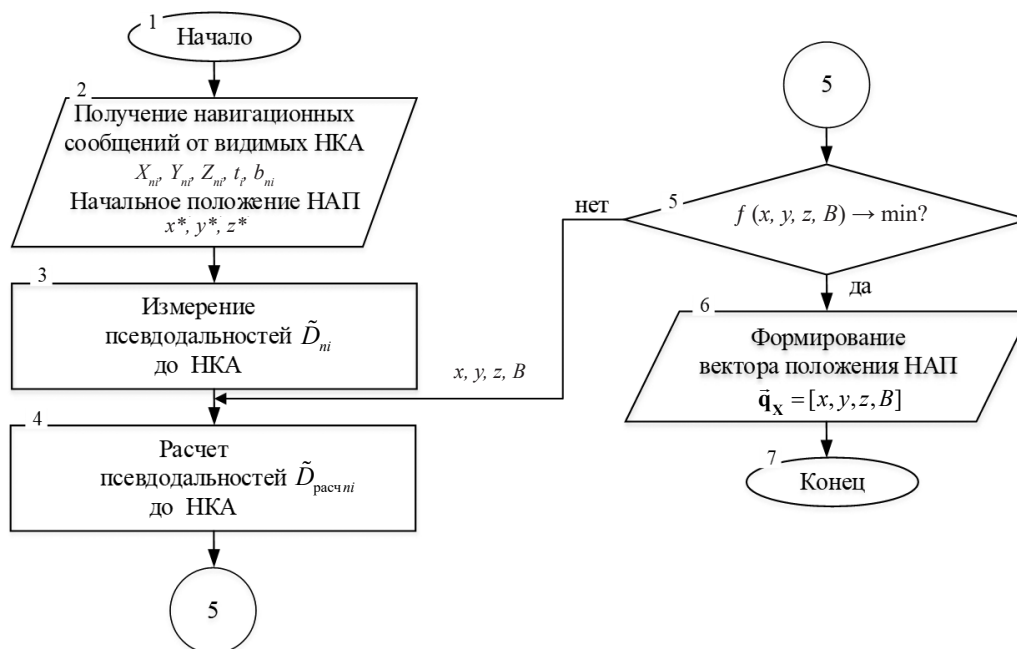


Рис. 3. Блок схема навигационного алгоритма при использовании метода деформируемых многогранников

Бюджет погрешностей определения псевдодальности

Источник погрешности	$\sigma_{\delta D}$, м
Эфемериды	2,6
Часы спутника	2
Ионосфера	4
Тропосфера	0,5
Многолучевость	2,5
Приемник	1,5
Прочие	2
Суммарная погрешность	6,2

составляющих соответствуют остаточным значениям погрешностей, т.е. предполагается, что в приемнике приняты меры по снижению погрешностей определения псевдодальности [1].

Для моделирования измеренных с помощью НАП псевдодальностей согласно выражению (1) используются:

- истинные дальности от НКА до потребителя $D_{ист}$, рассчитанные с использованием эфемерид ГЛОНАСС [<https://www.glonass-iac.ru/>];

- суммарные случайные величина δe_i с гауссовским законом распределения, имеющие нулевые МО и СКО погрешностей оценки псевдодальностей равной 6,2 м (см. табл. 1) и 100 м (без принятия мер по снижению погрешностей в НАП);

- величина разности хода часов потребителя и системной ШВ равной 1 мкс (предельная погрешность синхронизации для стандартов частоты 3-го класса точности) [9].

НАП с координатами [36°N; 37°W; h=400 м] осуществляет измерение псевдозадержек с периодичностью 1 с. Оценка вектора положения $\vec{q}_x = [xyzB]^T$ осуществляется по рассчитанным псевдодальностям \tilde{D}_i , до 1-го, 2-х и 3-х спутников ГЛОНАСС в течении 4-х часов.

Для количественной характеристики результативности предложенного алгоритма используем оценку ошибки местоположения $\Delta \vec{r}$ между истинной и расчетной точкой нахождения потребителя согласно выражению

$$\Delta \vec{r} = \sqrt{(x_{ист} - x_{расч})^2 + (y_{ист} - y_{расч})^2 + (z_{ист} - z_{расч})^2},$$

где $x_{ист}, y_{ист}, z_{ист}$ — истинные координаты НАП; $x_{расч}, y_{расч}, z_{расч}$ — координаты НАП, рассчитанные при поиске минимума функционала $f(x, y, z, B)$ в предложенном алгоритме.

Результаты моделирования

На рис. 4 представлен результат оценки ошибки местоположения $\Delta \vec{r}$ НАП по одному НКА ГЛОНАСС 13 с СКО измерений псевдодальностей равными 6,2 м и 100 м.

На рис. 5 представлен результат оценки ошибки местоположения $\Delta \vec{r}$ по двум НКА ГЛОНАСС 13 и 24 и трем НКА ГЛОНАСС 13, 24 и 25 с СКО измерений псевдодальностей равными 6,2 м.

На рис. 6 представлен результат оценки ухода ШВП от системной шкалы времени на момент времени 4:00 UT по одному НКА ГЛОНАСС (13), двум НКА ГЛОНАСС 13 и 25, и трем НКА ГЛОНАСС 13, 24 и 25 с СКО измерений псевдодальностей равными 6,2 м.

Анализ оценки ухода ШВП показал, что при использовании предложенного алгоритма потребитель способен в течении часа по измерениям псевдодальностей лишь до одного НКА ГЛОНАСС привязать свои часы к системной ШВ

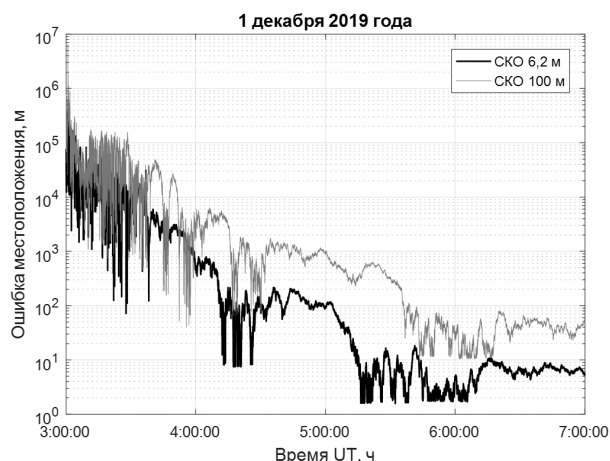


Рис. 4. Результат оценки ошибки местоположения НАП по одному НКА

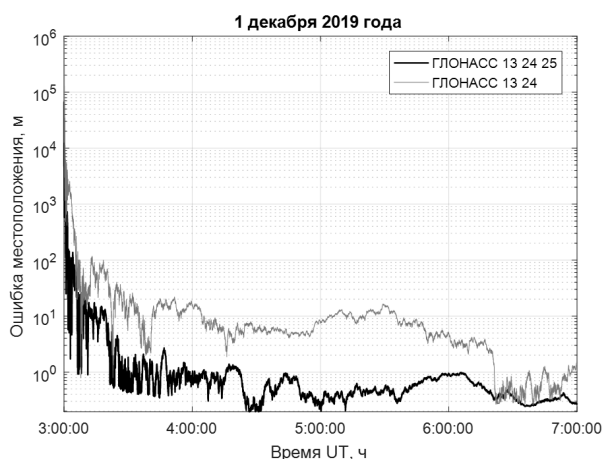


Рис. 5. Результат оценки ошибки местоположения НАП по двум и трем НКА

с погрешностью не больше 100 нс, а при использовании измерений от 3-х НКА ГЛОНАСС за то же время — не больше 20 нс. Решение навигационной задачи с использованием предложенного алгоритма в условиях ограниченной видимости по 1–3 НКА позволяет потребителю оценить местоположение и время с точностью, которая обеспечивается известными алгоритмами при видимости более 4-х спутников [1]. Усредненные величины, характеризующие точность определения местоположения и синхронизации ШВ потребителя по одному, двум и трем НКА сведены в табл. 2, где отображаются МО и СКО параметров, полученных при наблюдении НКА за 2, 3 и 4 часа. Величины ошибки по местоположению $\Delta \vec{r}$ и разности хода ШВП и системной шкалы времени (B) получены при обработке псевдодальностей с СКО равными 6,2 м и 100 м.

Из анализа полученных результатов моделирования следует, что:

- для оценки местоположения (при измерениях псевдодальности с СКО 6,2 м) с дециметровой точностью требуется наблюдение 3-х

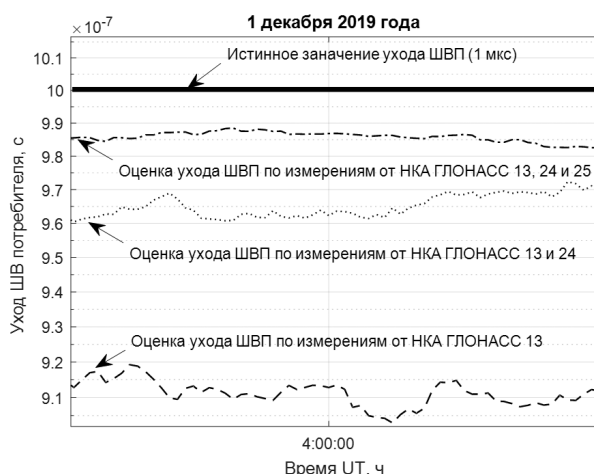


Рис. 6. Результат оценки ухода ШВП от системной шкалы времени

НКА ГЛОНАСС не менее 2-х часов, а с метровой точностью достаточно измерений по 1-му НКА ГЛОНАСС на интервале свыше 3-х часов;

- для гарантированной оценки местоположения с высокой точностью необходимо принимать меры по снижению значений суммарных случайных величин измерения псевдодальностей δe_i ;

- в условиях ограниченной видимости для синхронизации часов с точностью десятков нс потребителю достаточно включить НАП на 1–2 часа.

На основании представленных результатов можно сделать вывод, что при использовании методов эмпирического поиска в условиях видимости от одного до трех НКА и при неизвестном смещении ШВ потребителя относительно системной ШВ возможно произвести оценку вектора положения приемника НАП. Проведенное моделирование показало, что при видимости даже одного НКА при накоплении измерений псевдодальностей в течении 3 часов потребитель может определить свое местоположение с точностью в 5–8 метров. При использовании изме-

Таблица 2

Точность определения местоположения и синхронизации ШВ потребителя

Видимые НКА	$\sigma_{\delta D}$, м	$\Delta \vec{r}$, м (МО/СКО)			B , мкс (МО/СКО)		
		за 2 ч	за 3 ч	за 4 ч	за 2 ч	за 3 ч	за 4 ч
Один	6,2	100/12	6/2	5/1	0,08/0,01	0,02/0,01	0,01/0,005
	100	1000/100	50/10	30/3	0,1/0,05	0,03/0,02	0,01/0,005
Два	6,2	8/1,5	4/1	0,7/0,3	0,03/0,01	0,01/0,005	0,005/0,001
	100	100/15	30/3	8/1	0,04/0,01	0,02/0,005	0,005/0,001
Три	6,2	0,3/0,2	0,3/0,1	0,2/0,1	0,01/0,001	0,005/0,001	0,001/0,0005
	100	5/1	3/0,5	3/0,5	0,02/0,001	0,006/0,001	0,001/0,0005

рений от 2 НКА тот же результат достигается за 2 часа, а 3 НКА — за время до 30 мин.

Для синхронизации часов с точностью 500 нс потребителю достаточно 30 минут наблюдений за одним НКА. При наблюдении за 2–3 НКА потребитель может синхронизировать часы за то же время с точностью единиц наносекунд.

Литература

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. Перова А.И., Харисова В.Н. Изд. 4-е перераб. и доп. — М.: Радиотехника. 2010. 800 с.

2. Пащенко И.В., Козлов В.В., Соколов А.И. Внедрение методов высокоточного местоопределения на внутренних водных путях Российской Федерации // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2018. № 3. С. 28–35.

3. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В.С. Шебшаевич, П.П. Дмитриев, Н.В. Иванцевич и др.; под ред. В.С. Шебшаевича. — М.: Радио и связь. 1993. 408 с.

4. Куприянов А.О. Глобальные навигационные спутниковые системы: Учеб. пособие. — М.: МИИГАиК. 2017. 76 с.

5. Соловьев Ю.А. Спутниковая навигация и её приложения. — М.: Эко-Трендз. 2003. 326 с.

6. Аоки М. Введение в методы оптимизации: Пер. с англ. — М.: Наука. 1977. 343 с.

7. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование: Учеб. для вузов — М.: Мир. 1975. 536 с.

8. Герцман В.Е., Экало А.В., Зайцев В.М., Шпекторов С.Л., Герастовский В.Ф., Ю.Б. Махненко, В.И. Прут. Анализ погрешностей навигационной аппаратуры потребителя ГЛОНАСС / GPS при проведении траекторных измерений // Гиропскопия и навигация. 2005. № 3 (50). С. 3–13.

9. Бюллетень В16/2018. Эталонные сигналы частоты и времени. Характеристики и программы передач через радиостанции, наземные

и космические средства навигации, сети телевизионного вещания и глобальную сеть интернет / ФГУП «ВНИИФТРИ». — М.: Изд-во ВНИИФТРИ. 2018. 32 с.

References

1. GLONASS. Principles of construction and functioning / ed. Perova A.I., Kharisova V.N. Ed. 4th rev. and add. — M.: Radio engineering. 2010. 800 p.

2. Pashchenko I.V., Kozlov V.V., Sokolov A.I. Introduction of high-precision positioning methods on the inland waterways of the Russian Federation // Vestnik AGTU. Ser.: Marine engineering and technology. 2018. № 3. P. 28–35.

3. Network satellite radio navigation systems / V.S. Shebshaevich, P.P. Dmitriev, N.V. Ivantsevich and others; ed. V.S. Shebshaevich. — M.: Radio and communication. 1993. 408 p.

4. Kupriyanov A.O. Global navigation satellite systems: Textbook. allowance. — M.: MIIGAIK. 2017. 76 p.

5. Soloviev Y.A. Satellite navigation and its applications. — M.: Eco-Trends. 2003. 326 p.

6. Aoki M. Introduction to optimization methods: Per. from English. — M.: Nauka. 1977. 343 p.

7. Himmelblau D. Applied nonlinear programming: Textbook. for universities — M.: Mir. 1975. 536 p.

8. Gertsman V.E., Ekalo A.V., Zaitsev V.M., Shpektorov S.L., Gerastovsky V.F., Makhnenko Yu.B., Rod V.I. Analysis of errors in the navigation equipment of the GLONASS / GPS consumer when carrying out trajectory measurements // Gyroscopy and Navigation. 2005. № 3 (50). P. 3–13.

9. Bulletin B16/2018. Reference signals of frequency and time. Characteristics and program schedules for radio stations, terrestrial and space navigation aids, television broadcast networks and the global Internet / FSUE «VNIIFTRI». — M.: Publishing house of VNIIFTRI. 2018. 32 p.