

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОЧАСТОТНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЗАДЕРЖКИ СИГНАЛА В ИОНОСФЕРЕ**

А. С. Курносов\*, Ю. Л. Фатеев

Сибирский федеральный университет, Институт инженерной физики и радиоэлектроники  
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 28  
\*E-mail: kurnosov89@gmail.com

*Предметом исследования является одночастотный метод определения вертикальной задержки сигнала в ионосфере. Целью работы является проверка метода на данных модели. Для проверки работоспособности предложенного одночастотного метода применялся метод имитационного моделирования. Рассмотрены существующие подходы для определения задержки сигнала в ионосфере. Существующие методы обладают недостатками, снижающими точность определения задержки сигнала в ионосфере. Двухчастотный кодовый метод содержит систематическую погрешность, вызванную трактами аппаратуры. Применение двухчастотного фазового метода требует разрешения фазовой неоднозначности. Стандартный одночастотный метод использует прямые измерения кодовой и фазовой псевдодальности и, соответственно, обладает недостатками кодового и фазового методов, описанных выше. Решением данной проблемы является переход от прямых измерений к использованию приращений соответствующих измерений. Данный подход реализован в одночастотном методе, использующем в своей основе приращения кодовых и фазовых измерений. Приведено подробное описание данного метода и результаты моделирования. По результатам моделирования подтверждена работоспособность метода на данных модели, а также сделан вывод о необходимости проведения экспериментальных исследований разработанного метода.*

*Ключевые слова: ионосфера, одночастотный метод, задержка сигнала в ионосфере, вертикальная задержка, двухчастотный метод, фильтрация измерений.*

Vestnik SibGAU  
Vol. 16, No. 1, P. 91–96**SINGLE-FREQUENCY METHOD SIMULATION  
FOR DETERMINATION OF VERTICAL IONOSPHERIC SIGNAL DELAY**

A. S. Kurnosov\*, Y. L. Fateev

Siberian Federal University, Institute of Engineering Physics and Radioelectronics  
28, Kirenskogo Str., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation  
\*E-mail: kurnosov89@gmail.com

*The actual problem of recent global navigation satellite systems is increasing of positioning accuracy. This problem has several solutions. The first one is decreasing of pseudorange measurements error. The significant contribution in the budget of the pseudorange error is signal delay in the ionosphere. The contribution of the ionospheric error could be 60 percent of this budget. Therefore, the ionospheric error exception will have resulted in significant increasing of positioning accuracy.*

*The research subject is a single-frequency method of determining the vertical signal delay in the ionosphere. The purpose of work is verification the method on model data. Single-frequency method verification was performed using simulation modeling. The article considers existing approaches for determining signal delay in the ionosphere. The dual-frequency method contains the systematic error due to satellite and receiver hardware delays. Dual-frequency phase method usage requires phase ambiguity resolution. Standard single-frequency method uses direct measurements of code and phase pseudorange, and respectively has limited precision as well as dual-frequency methods described above. The solution of this problem is usage of measurement first differences instead of direct measurements. This approach is realized in the one-frequency method based on code and phase measurement first differences.*

*The article gives a detailed description of this method and the results of the simulation. Simulation results has confirmed efficiently of this method and allows starting experimental researches.*

*Keywords: ionosphere, one-frequency method, dual-frequency method, ionospheric delay, measurement filtration.*

**Введение.** Актуальной задачей современной спутниковой радионавигации является повышение точности определения координат потребителя. Данная задача имеет несколько решений. Одним из решений является уменьшение погрешностей при измерениях псевдодальности.

Наибольший вклад в бюджет погрешности измерения псевдодальности вносит задержка сигнала в ионосфере. Вклад ионосферы в бюджет погрешности измерения псевдодальности составляет около 60 % [1; 2]. Соответственно, исключение погрешности приведет к существенному повышению точности определения координат потребителя.

В настоящее время для компенсации задержки сигнала в ионосфере в режиме реального времени используются двухчастотные методы [3–5]. Данные методы имеют свои недостатки. Двухчастотный кодовый метод имеет систематическую погрешность, обусловленную задержкой сигнала в трактах навигационной аппаратуры. Двухчастотные фазовые методы использовать напрямую не представляется возможным из-за необходимости разрешения фазовой неоднозначности.

**Стандартные методы определения задержки сигнала в ионосфере.** Воспользуемся допущением, что ионосфера представляет собой тонкий слой на некоторой высоте  $h$ , в котором сосредоточены все свободные электроны (рис. 1). Тогда наклонную задержку сигнала в ионосфере можно представить как произведение вертикальной задержки на величину удлинения пути сигнала [3]:

$$I_n = I_0 \cdot OF, \quad (1)$$

где  $I_0$  – вертикальная задержка сигнала в ионосфере;  $OF = 1/\cos\beta$  – фактор наклона.

Исходя из геометрии рисунка, применяя теорему синусов, можно определить фактор наклона [2–4]:

$$OF(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_e}{R_e + h} \cdot \cos(\gamma)\right)^2}}, \quad (2)$$

где  $R_e$  – радиус Земли;  $h$  – средняя высота ионосферного слоя (~ 350 км);  $\gamma$  – угол места НКА.

Задержку сигнала в ионосфере можно определить, используя дисперсионные свойства ионосферы, а именно, зависимость ионосферной задержки от частоты сигнала [4; 6; 7]. Данный подход реализован в стандартных методах определения задержки сигнала в ионосфере. Например, считается, что разность между псевдодальномерными кодовыми измерениями на несущих частотах будет целиком определяться ионосферной погрешностью:

$$I_n = \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \cdot ((P_{L2} - P_{L1}) + \Delta\delta R), \quad (3)$$

где  $P_{L1}$  и  $P_{L2}$  – псевдодальности, соответственно, на  $L1$  или  $L2$ ;  $\Delta\delta R$  – погрешности, вызванные трактами навигационной аппаратуры и трактами НКА.

Данное утверждение не вполне состоятельное, потому что при разности псевдодальностей исключаются все частотно независимые погрешности, но между тем остаются погрешности, вызванные трактами навигационной аппаратуры и трактами НКА. В конечном итоге, данные систематические погрешности включаются в ионосферную погрешность, что не совсем корректно для оценки истинного значения задержки сигнала в ионосфере. Для исключения погрешностей, связанных с трактами навигационной аппаратуры и трактами НКА, применяется калибровка аппаратуры [8–10].

Стоит отметить, что наряду с указанными недостатками двухчастотный кодовый метод включает в себя достаточно большую погрешность, обусловленную шумом кодовых измерений. Для уменьшения влияния данной составляющей применяют менее шумные фазовые измерения, которые несут в себе фазовую неоднозначность:

$$I_n = \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \times (\lambda_{L1}(\Phi_{L1} - N_{L1}) - \lambda_{L2}(\Phi_{L2} - N_{L2}) + \Delta\delta R), \quad (4)$$

где  $\Phi$  – фазовая псевдодальность, измеренная в циклах;  $N$  – неоднозначности фазовых измерений;  $\lambda$  – длина волны;  $\Delta\delta R$  – погрешности, вызванные трактами навигационной аппаратуры и трактами НКА.

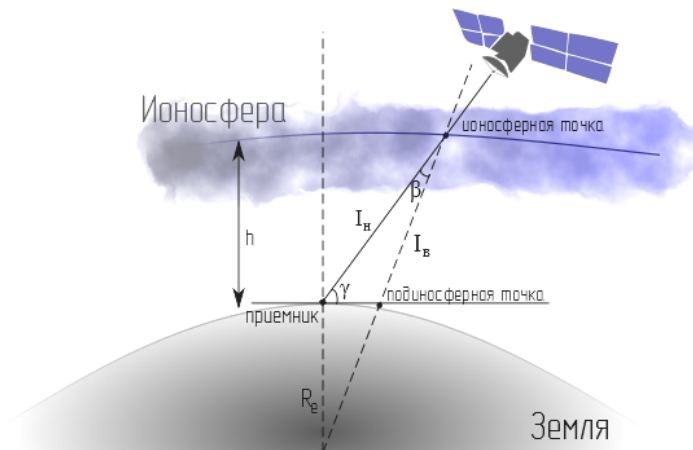


Рис. 1. Прохождение сигнала через ионосферу

Наряду с двухчастотными методами существует одночастотный метод, использующий в своей основе кодовые и фазовые измерения на одной несущей частоте:

$$I_n = \frac{R-L}{2}, \quad (5)$$

где  $R$  и  $L$  – кодовая и фазовая псевдодальность соответственно.

Данный метод избавлен от погрешностей, присущих двухчастотным методам. Тем не менее использовать напрямую одночастотный метод невозможно, поскольку кодовые измерения псевдодальности имеют систематическую погрешность, а псевдодальномерные измерения по фазе содержат неоднозначность [4].

**Одночастотный метод определения задержки сигнала в ионосфере.** Систематические погрешности и фазовую неоднозначность, присутствующие в псевдодальномерных измерениях по коду и фазе несущей (дискретность измерений одна секунда), можно считать квазипостоянными. Соответственно, приращения соответствующих измерений погрешностей содержать не будут [11; 12].

Запишем уравнение (5) с учетом того, что кодовая и фазовая псевдодальности являются приращениями соответствующих измерений:

$$\Delta I_n = \frac{\Delta R - \Delta L}{2}, \quad (6)$$

где  $\Delta R$  – приращение кодовой псевдодальности; аналогично  $\Delta L$  – приращение фазовой псевдодальности;  $i$  – момент времени.

Приращение наклонной задержки в ионосфере обусловлено изменением фактора наклона и вертикальной задержки:

$$\Delta I_n = \Delta OF(\gamma) \cdot I_v + OF(\gamma) \cdot \Delta I_v, \quad (7)$$

где  $\Delta OF(\gamma)$  – приращение наклонного фактора;  $I_v$  и  $\Delta I_v$  – вертикальная задержка и ее приращение;  $i$  – момент времени.

Вертикальная задержка является медленно меняющейся функцией во времени, соответственно, приращения данной функции будут очень малы и, как следствие, можно пренебречь вторым слагаемым правой части уравнения (7):

$$\Delta I_n = \Delta OF(\gamma) \cdot I_v. \quad (8)$$

Из выражения (8) достаточно легко определить значение вертикальной задержки сигнала в ионосфере, но стоит учесть тот факт, что при использовании односекундных приращений наклонный фактор и наклонная задержка сигнала изменяются незначительно, но при этом шум измерений остается неизменным [13]. В результате зашумленности измерений погрешность определения вертикальной задержки будет больше, чем полезный сигнал.

Для исключения данного недостатка необходимо увеличивать длительность интервала измерений. Длительность интервала можно увеличить за счет накопления односекундных приращений. При этом увеличивая длительность интервала, нужно помнить о вы-

полнении ограничений, накладываемых на функцию вертикальной задержки. Ограничения, накладываемые на функцию, заключаются в том, что нельзя увеличивать до бесконечности интервал измерений, иначе условие о медленно изменяющейся функции перестанет выполняться.

**Фильтрация измерений.** Измерения параметров ионосферы поступают непрерывно, если применять постоянный интервал для накопления измерений, то данный алгоритм, во-первых, потребует больших затрат памяти на хранение всего массива измерений, а во-вторых, результат нельзя получить раньше, чем наберется необходимое количество измерений.

Для того чтобы избежать данных ограничений, целесообразно использовать рекуррентный алгоритм, при котором новое измерение будет использоваться для уточнения решения, полученного ранее. Другим важным условием является необходимость постепенного выведения «устаревших» данных из алгоритма. Соответственно, измерения, которые приходят позже, должны иметь больший вес по сравнению с данными, которые уже используются. В расчете это реализуется с помощью введения коэффициента фильтра  $k$  [14; 15].

Пусть имеются измерения на некотором интервале секунд. Уравнение для наклонной задержки по одному НКА будет иметь следующий вид:

$$I_\phi(i) = (1-k) \cdot I_\phi(i-1) + \Delta I_n(i), \quad (9)$$

где  $I_\phi$  – фильтрованное значение наклонной задержки;  $k$  – коэффициент фильтра ( $0 < k < 1$ );  $\Delta I_n$  – односекундные приращения наклонной задержки;  $i$  – момент времени.

Метод основывается на гипотезе, что задержка сигнала в ионосфере – медленно меняющаяся функция от времени, поэтому коэффициент  $k$  подбирается так, чтобы изменения ионосферы не оказывали влияния на алгоритм.

Аналогично выражению (9) можно произвести фильтрацию полных приращений наклонного фактора, затем подставляя полученные фильтрованные значения в (8), можно найти значение вертикальной задержки сигнала. Анализируя поведение НКА на высоких углах места, можно сделать вывод, что приращения наклонного фактора при положении НКА, близком к зениту, будут незначительны по сравнению с приращениями вертикальной задержки. Данное обстоятельство указывает на то, что в таком случае нельзя пренебрегать правой частью выражения (7). Следовательно, работать только по одному НКА неэффективно, поэтому необходимо в расчете использовать все видимое созвездие НКА, но при этом необходимо уменьшать вес НКА с высоким углом места, для реализации этого применим метод наименьших квадратов.

**Определение вертикальной задержки сигнала.** Предположим, что вертикальная задержка сигнала в зоне радиовидимости будет мало различаться для каждого отдельного НКА. Выполним подстановку фильтрованных значений наклонной задержки и фактора наклона для каждого НКА в уравнение (1) и получим переопределенную систему линейных уравнений.

Для решения данной системы уравнений и нахождения суммарной вертикальной задержки сигнала в ионосфере по всем видимым НКА применим метод наименьших квадратов. В целях упрощения покажем подход для текущего момента времени.

Для нахождения вертикальной задержки сигнала в ионосфере ( $I_0$ ) необходима минимизация следующего функционала:

$$F = \sum_{j=1}^N (I_{\phi_j} - I_0 \cdot OF_{\phi_j})^2, \quad (10)$$

где  $I_{\phi_j}$  – фильтрованное значение наклонной задержки для  $j$  НКА;  $OF_{\phi_j}$  – фильтрованное значение наклонного фактора для  $j$  НКА;  $j$  – номер НКА;  $N$  – общее количество видимых НКА.

Запишем необходимое условие экстремума  $\frac{\partial F}{\partial I_0}$ :

$$2 \sum_{j=1}^N (-2I_{\phi_j} \cdot OF_{\phi_j} + 2I_0 \cdot OF_{\phi_j}^2) = 0. \quad (11)$$

Запишем полученный результат:

$$I_0 = \frac{\sum_{j=1}^N (OF_{\phi_j} \cdot I_{\phi_j})}{\sum_{j=1}^N (OF_{\phi_j}^2)}. \quad (12)$$

**Моделирование одночастотного метода.** Для проверки метода было выполнено моделирование. В качестве исходных данных при моделировании использовались данные углов места, полученные с навигационного приемника типа МРК за период с 4 по 6 мая 2013 г., а также истинная вертикальная задержка сигнала. В качестве модели для истинной вертикальной задержки сигнала в ионосфере была выбрана модель Клобучара [3].

Используя значения углов места с помощью выражения (2), находим наклонные факторы для всех НКА. Затем задаем истинную вертикальную задержку сигнала согласно модели Клобучара [3]:

$$I_0 = \begin{cases} A_1 + A_2 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi(t - A_3)}{A_4}\right), & |t - A_3| < A_4/4, \\ \text{иначе } A_1, \end{cases} \quad (13)$$

где  $A_1 = 5 \cdot 10^{-9}$  с – значение зенитной задержки в ночное время;  $A_2 = \sum_{i=0}^3 \alpha_{i-1} \cdot \Phi_m^{i-1}$  – амплитуда функции косинуса для дневных величин;  $A_3 = 50400$  с – фаза, соответствующая пику функции косинуса;  $A_4 = \sum_{i=0}^3 \beta_{i-1} \cdot \Phi_m^{i-1}$  – период функции косинуса ( $\geq 72000$  с);  $\Phi_m = \Phi_i + 0,064 \cdot \cos(\lambda_i - 1,617)$  – геомагнитная широта подионосферной точки;  $\Phi_i$  и  $\lambda_i$  – широта и долгота пользователя в полуциклах.

Предполагая, что истинная вертикальная задержка сигнала равна по всем НКА, применив (1) находим истинную наклонную задержку сигнала для каждого

НКА. На данном этапе в истинную наклонную задержку сигнала каждого НКА добавляется белый гауссов шум. При обработке реальных измерений было установлено, что шум кодовых измерений лежит в пределах 0,5–0,7 м. Для моделирования была выбрана амплитуда шума 0,5 м.

На следующем этапе находим односекундные приращения для наклонного фактора, для этого вычисляется разность между текущим и последующим измерением. В выбранной модели кодовые и фазовые измерения, представленные в (6), разделить невозможно, поэтому находятся сразу односекундные приращения наклонной задержки сигнала.

Для правильной работы алгоритма необходимо следить за моментами прихода и ухода НКА, потому что в данные моменты будут наблюдаться выбросы измерений в односекундных приращениях, которые в итоге снижают точность определения вертикальной задержки сигнала. Для исключения выбросов из расчета необходимо следить за измерениями наклонного фактора и в момент времени, соответствующий выбросу, исключать как приращения наклонного фактора, так и приращения наклонной задержки сигнала.

Затем с помощью вышеуказанных подходов находится вертикальная задержка сигнала. Важным этапом в моделировании является подбор коэффициента фильтра. На рис. 2 представлена вертикальная задержка сигнала для различных коэффициентов. Коэффициент фильтра выбирается таким образом, чтобы обеспечить минимум шумов вертикальной задержки и в то же время обеспечить квазистационарность ионосферы за время постоянной фильтра. На рис. 3 представлено количество видимых спутников за двухдневный период.

Сравнивая полученную и исходную задержку сигнала между собой, можно утверждать, что одночастотный метод определения вертикальной задержки сигнала работоспособен, а расхождения между исходной и полученной задержкой вызваны изменениями в ионосфере и выбранной моделью шумов псевдодальномерных измерений.

**Заключение.** Таким образом, результаты, полученные в ходе моделирования, подтверждают работоспособность одночастотного метода. В ходе моделирования было еще раз подтверждена необходимость выбора коэффициента фильтра. Главным критерием выбора коэффициента фильтра служит постоянство ионосферы за время постоянной фильтра.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что одночастотный метод позволяет определять вертикальную задержку сигнала в ионосфере с более высокой точностью, чем описанные методы, поскольку для данного метода будут отсутствовать недостатки, присущие существующим методам. В конечном итоге, на точность данного метода будут влиять флуктуации часов приемника и НКА, а также флуктуации задержки сигнала в ионосфере и шум измерений. Для определения точности данного метода в будущем планируется проведение эксперимента на реальных данных.

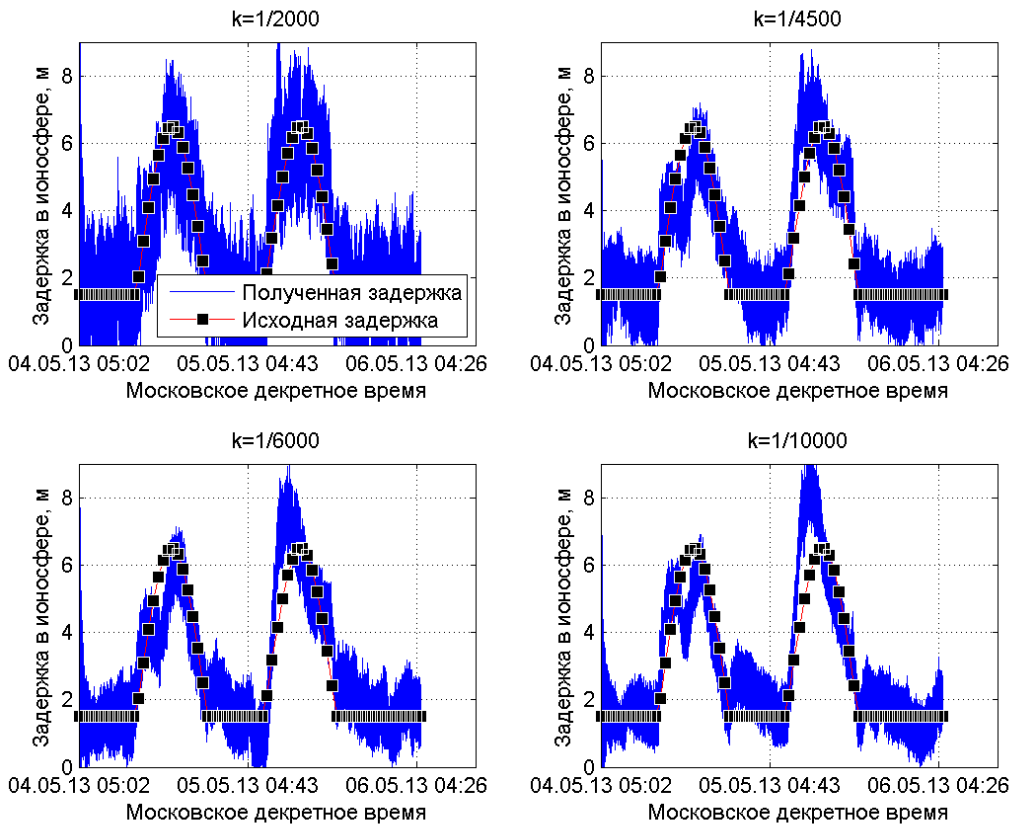


Рис. 2. Вертикальная задержка в ионосфере

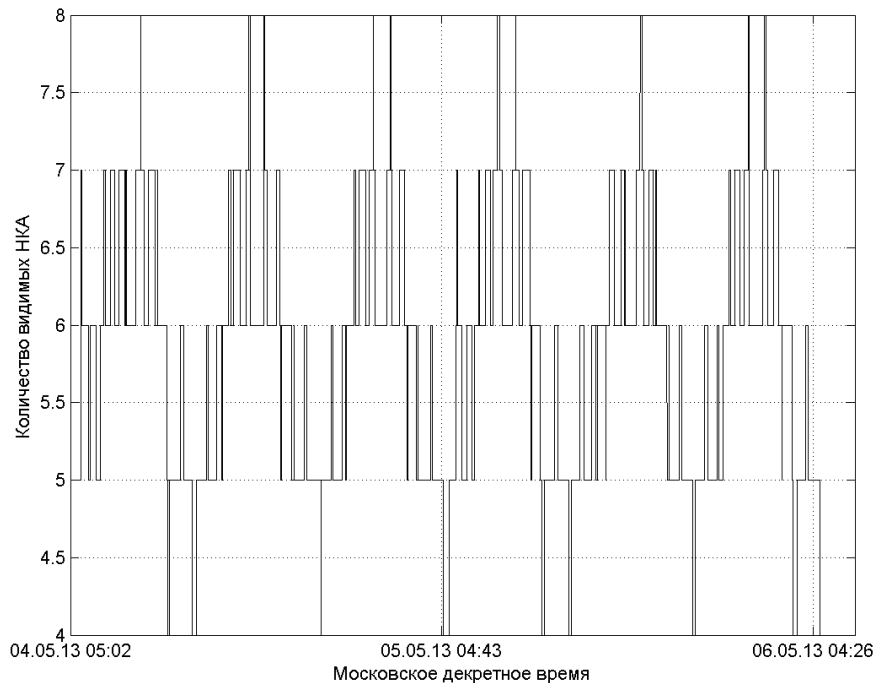


Рис. 3. Количество видимых спутников

**Библиографические ссылки**

1. Афраймович Э. Л., Первалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск : ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.

2. Верещагин А. И., Фатеев Ю. Л. Исследование компенсации многолучевости стационарного навигационного приемника // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 9. С. 43–45. ISSN 2070-0784.

3. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : монография. В 2 т. Т. 1 / Сибирская государственная геодезическая академия. М. : ФГУП «Картгеоцентр», 2005. 334 с.

4. Харисов В. Н., Перов А. И., Болдин В. А. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. М. : Радиотехника, 2010. 800 с.

5. Schaer S. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System. Switzerland, 1999. 205 p. ISBN: 9783908440017.

6. Дымович Н. Д. Ионосфера и ее исследование. М. : Энергия, 1964. 40 с.

7. Memarzadeh Y. Ionospheric modeling for precise GNSS applications. Delft University of Technology, 2009. 242 p.

8. Способ определения погрешности формирования псевдодальности навигационного сигнала : пат. 2498225 Рос. Федерация. № 2012125480/28 ; заявл. 19.06.2012 ; опубл. 10.11.2013, Бюл. № 31. 8 с.

9. Гребенников А. В. Исследование методов и разработка аппаратуры приема и обработки сигналов спутниковых радиотехнических систем : дис. ... канд. техн. наук : 05.12.21. Красноярск : КГТУ, 2000. 97 с.

10. Демьянов В. В. Коррекция глобальной модели полного электронного содержания по текущим измерениям ионосферной задержки сигналов спутниковых радионавигационных систем : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.03. Иркутск, 2000. 136 с.

11. Nisher P., Trethewey M. GPS Ionosphere Determination Using L1 Only // Proceedings of the 1996 National Technical Meeting of The Institute of Navigation. Santa Monica, CA, 1996, Pp. 625–635.

12. Определение параметров движения космического аппарата бортовой навигационной системой по измерениям псевдоскорости и псевдодальности спутниковых навигационных систем / Э. Л. Аким [и др.] // Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. 2004. № 20.

13. Kurnosov A. S., Fateev Y. L. Ionosphere parameters definition // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). September 12–13, Krasnoyarsk. Proceedings. Krasnoyarsk : Siberian Federal University, 2013. IEEE Catalog Number: CFP13794-CDR. ISBN: 978-1-4799-1060-1. DOI: 10.1109/SIBCON.2013.6693622.

14. Эконометрия : учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 744 с.

15. Грешилов А. А., Стакун В. А., Стакун А. А. Математические методы построения прогнозов. М. : Радио и связь, 1997. 112 с.

## References

1. Afraymovich E. L., Perevalova N. P. GPS-monitoring *verkhney atmosfery Zemli* [GPS - monitoring of the Earth's upper atmosphere]. Irkutsk, GU NTs RVKh VSNTs SO RAMN Publ., 2006. 480 p.

2. Vereshchagin A. I., Fateev Yu. L., [Investigation of stationary navigation receiver multipath compensation]. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012, no. 9, p. 43–45 (In Russ.).

3. Antonovich K. M. *Ispol'zovanie sputnikovyykh radionavigatsionnykh sistem v geodezii*. [Satellite navigation systems in geodesian application]. Moscow, FGUP "Kartgeotsentr" Publ., 2005, 334 p.

4. Kharisov V. N., Perov A. I., Boldin V. A., *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya*. [GLONASS. Construction principles and operation]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010, 800 p.

5. Schaer S. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System. Ph.D.dissertation. ISBN: 9783908440017. Switzerland. Publ., 1999, 205 p.

6. Dymovich N. D. *Ionosfera i ee issledovanie* [Ionosphere and its investigation.]. Moscow, Energiya Publ., 1964, 40 p.

7. Memarzadeh Y. Ionospheric modeling for precise GNSS applications. Ph.D. dissertation Delft University of Technology, 2009, 242 p.

8. Vereshchagin A. I., Fateev Yu. L., Novikov V. B., Golenok A. I., Tyapkin V. N., Shtro P. I. *Sposob opredeleniya pogreshnosti formirovaniya psevdodal'nosti navigatsionnogo signala* [The error estimation method of the formation of navigation signal pseudorange]. Patent RF, no. 2498225, 2013.

9. Grebennikov A. V. *Issledovanie metodov i razrabotka apparatury priema i obrabotki signalov sputnikovyykh radiotekhnicheskikh sistem*. Diss. Kand. Tekhn. nauk [Methods research and satellite radioelectronic system signals reception and processing equipment development. Cand. of technical sciences diss.]. Krasnoyarsk, 2000, 97 p.

10. Dem'yanov V. V. *Korreksiya global'noy modeli polnogo elektronnoy soderzhaniya po tekushchim izmereniyam ionosfernoy zaderzhki signalov sputnikovyykh radionavigatsionnykh sistem*. Diss. kand. tekhn. nauk [Global total electron content model correction according to current measurements of GNSS signal ionospheric delay. Cand. of techn. sciences diss.] Irkutsk, 2000, 136 p.

11. Nisher P., Trethewey M. GPS Ionosphere Determination Using L1 Only. *Proceedings of the 1996 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, Santa Monica, CA, January 1996*, p. 625–635.

12. Akim E. L., Kapralov M. A., Stepan'yants V. A., Tuchin A. G., Tuchin D. A. *Opredelenie parametrov dvizheniya kosmicheskogo apparata bortovoy navigatsionnoy sistemoy po izmereniyam psevdoskorosti i psevdodal'nosti sputnikovyykh navigatsionnykh sistem* [Space vehicle motion parameters definition by on-board navigation system over GNSS pseudovelocity and pseudorange measurements]. Preprint IPM im. M. V. Keldysha RAN N 20, Moscow, 2004.

13. Kurnosov A. S., Fateev Y. L. Ionosphere parameters definition. *2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Proceedings. Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 12–13, 2013. IEEE Catalog Number: CFP13794-CDR. ISBN: 978-1-4799-1060-1. DOI: 10.1109/SIBCON.2013.6693622.

14. Suslov V. I., Ibragimov N. M., Talysheva L. P., Tsyplakov A. A. *Ekonometriya. Uchebnoe posobie*. [Econometrics. Textbook]. Novosibirsk, Izdatel'stvo SO RAN Publ., 2005, 744 p.

15. Greshilov A. A., Stakun V. A., Stakun A. A. *Matematicheskie metody postroeniya prognozov*. [Mathematical methods for constructing forecasts]. Moscow. Radio i svyaz'. Publ., 1997, 112 p.