

Метод вычисления ионосферной задержки в узлах ионосферной сетки в широкозонном функциональном дополнении ГЛОНАСС

В. Г. Сернов, к. т. н., *sernov_vg@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Ю. В. Исаев, аспирант, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Д. В. Филимонова, аспирант, *filimonova.dv@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматриваются системы функционального дополнения космического базирования (системы SBAS) глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС), которые создаются для повышения точности и надежности навигации с использованием ГНСС. Для обеспечения высокоточной дифференциальной коррекции необходимым является формирование и передача ионосферных поправок потребителю в зоне обслуживания системы SBAS. В статье рассматривается метод вычисления ионосферных задержек, основанный на формировании ионосферной сетки, используемый в американской системе функционального дополнения GPS — системе WAAS, и на его основе предложен модифицированный алгоритм для применения в российской системе функционального дополнения ГЛОНАСС — системе дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ–КФД). Значения, полученные в результате применения обоих алгоритмов в системе СДКМ–КФД, были сопоставлены со значениями, полученными из глобальной ионосферной карты IGS (International GNSS Service), сформированной в постобработке. В результате алгоритм, модифицированный для системы СДКМ–КФД, обеспечивает более высокую точность определения значения ионосферы на территории Российской Федерации, чем алгоритм, используемый в системе WAAS.

Ключевые слова: системы SBAS, дифференциальная навигация, ионосферные задержки, ионосферная сетка, целостность, повышенная точность

A Method to Calculate the Ionospheric Delay in Ionospheric Grid Points in the Wide-Area Functional Augmentation of GLONASS

V. G. Sernov, *Cand. Sci. (Engineering)*, *sernov_vg@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Yu. V. Isayev, *postgraduate student*, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

D. V. Filimonova, *postgraduate student*, *filimonova.dv@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Abstract. The article discusses satellite-based augmentation systems (SBAS) of global navigation satellite systems (GNSS) which are created to improve the accuracy and reliability of GNSS. To ensure the high-precision navigation, it is essential to generate and transmit the ionospheric corrections to the user located in the SBAS service area. The paper considers a method for calculating ionospheric delays based on the ionospheric grid generation used in GPS augmentation system — WAAS. Based on it, an algorithm for use in the Russian GLONASS augmentation system — system of differential correction and monitoring (SDCM) is proposed. The values obtained as a result of applying both algorithms in SDCM were compared with the values obtained from the final version of the IGS (International GNSS Service) global ionospheric map generated in a post-processing mode. Hence, the algorithm developed for SDCM provides a higher accuracy in determining the value of the ionosphere in Russian Federation than that developed for WAAS.

Keywords: SBAS, differential navigation, ionospheric delays, ionospheric grid, integrity, increased accuracy

Введение

В настоящее время данные об ионосферных задержках используются в действующих системах функциональных дополнений космического базирования (системах SBAS L1) глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС), основанных на одночастотном сервисе, которые создаются для повышения точности и надежности с использованием ГНСС. В мире существуют и продолжают развиваться следующие системы SBAS: WAAS, EGNOS, BDSBAS, GAGAN, MSAS и др. Одной из тенденций систем SBAS является повышение точности расчета ионосферной сетки на всей территории зоны обслуживания. В перспективе будет осуществляться разработка систем SBAS L5, основанных на двухчастотном сервисе и обработке сигналов от нескольких основных созвездий. В этом случае ионосферные искажения компенсируются за счет обработки линейных комбинаций навигационных измерений.

Российской системой функционального дополнения является «система дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ–КФД), создаваемая АО «Российские космические системы». Система СДКМ–КФД обеспечивает формирование и доставку потребителям на территории Российской Федерации корректирующей информации и информации о целостности навигационных полей ГНСС ГЛОНАСС и GPS в формате SBAS» [1].

СДКМ–КФД состоит из следующих комплексов:

- комплекса сбора измерений, включающего сеть станций сбора измерений текущих навигационных параметров — 46 станций на территории Российской Федерации, 8 станций за рубежом и 3 станции в Антарктиде;
- комплекса обработки данных;
- комплекса доставки информации потребителю;
- средств комплекса контроля информации СДКМ–КФД.

Известно, что солнечная активность приводит к возмущениям ионосферы, вызывающим ошибки в измерениях псевдодальности [2]. Ионосферная задержка является одной из самых больших и непредсказуемых величин, которые оказывают негативное воздействие на сигналы ГНСС. Среднеквадра-

тическая ошибка в измерениях псевдодальностей, вызванная прохождением сигнала через ионосферу, составляет порядка 5–10 м [3], что нельзя не учитывать при работе с навигационными данными.

Для обеспечения высокоточной дифференциальной коррекции в системах SBAS одночастотного сервиса L1 необходимым является формирование и передача ионосферных поправок потребителю в зоне действия системы SBAS. В системах SBAS L1 используется модель формирования вертикальных ионосферных задержек, основанная на привязке ионосферных точек прокола к точкам ионосферной сетки. Эта модель была впервые предложена для системы WAAS [2] и позволяет передавать параметры модели потребителям для коррекции ионосферы в зоне действия SBAS в реальном времени.

Описание метода расчета ионосферной задержки в узлах ионосферной сетки

Ионосферной сеткой называется «совокупность точек на поверхности Земли, для которых вычисляются вертикальные ионосферные задержки. Ионосферные поправки к псевдодальностям навигационной аппаратуры потребителя (поправки, компенсирующие задержки навигационного сигнала в ионосфере) передаются в виде двух параметров:

- величина вертикальной ионосферной задержки $\hat{I}_G$;
- параметр GIVEI — условный цифровой код, однозначно связанный с дисперсией оценки вертикальной ионосферной задержки.

Эти параметры определяются в точках ионосферной сетки (ionospheric grid points, IGPs) и дают оценку вертикальной ионосферной задержки навигационного сигнала для случая вертикального прохождения сигнала через данную точку ионосферной сетки. Используя эти параметры, потребитель интерполирует полученную вертикальную ионосферную задержку из ближайших точек ионосферной сетки в наклонную ионосферную задержку для линии визирования рабочего спутника» [4].

На рис. 1 показан принцип формирования ионосферной сетки.

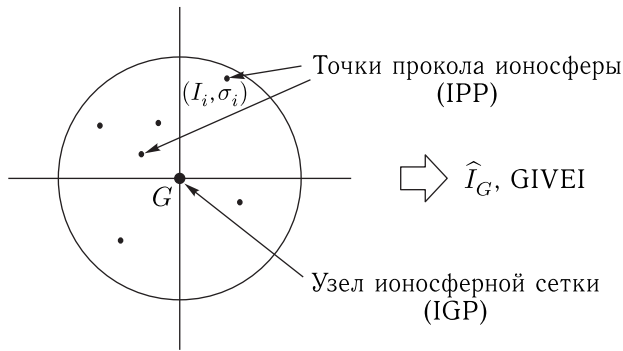


Рис. 1. Принцип формирования ионосферной сетки

Далее приведем метод расчета ионосферы в точках ионосферной сетки в системе WAAS, который используется также в системе KAAS [5]. Этот алгоритм использует привязку точек прокола ионосферы к узлам ионосферной сетки и учитывает суточные колебания ионосферы в пространстве за счет использования номинальной модели. В качестве номинальной модели для пересчета точек прокола к точке сетки в WAAS используется модель Клобучара [6]. В основу предложенной технологии для WAAS положена оценка по взвешенному методу наименьших квадратов. Согласно этой оценке ионосферная задержка $\hat{I}_G$ в точке сетки рассчитывается следующим образом:

$$\hat{I}_G = \hat{I}_{\text{nominal},G} \cdot \left(\left(\sum_{k=1}^K \left(\frac{I_i}{I_{\text{Nominal},i}} \right) \cdot \frac{1}{\varepsilon_i^2} \right) / \sum_{k=1}^K \left(\frac{1}{\varepsilon_i^2} \right) \right), \quad (1)$$

где I_i — значение ионосферы в точке прокола, $\hat{I}_{\text{nominal},G}$ — значение ионосферы в точке сетки, вычисленное по номинальной модели, $I_{\text{Nominal},i}$ — значение ионосферы в точке прокола сетки, вычисленное по номинальной модели, ε_i — ошибка вычисления ионосферы.

В случае WAAS вводится корреляционная функция, которая увеличивает значение дисперсии точки прокола в зависимости от удаления от точки сетки:

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{\Delta}, \quad (2)$$

где σ_i — дисперсия точки прокола, $\Delta = e^{-\left(\frac{d}{2D}\right)^2}$ — дополнительный коэффициент, зависящий от расстояния между точкой прокола и точкой сетки d

и длиной дуги большого круга Земли D , соответствующей центральному углу 5° , равной $5 \cdot 111,321$. Также стоит отметить, что формула (1) была разработана для зоны обслуживания WAAS (центральная часть Северной Америки). Коэффициенты для модели Клобучара передаются в навигационном сообщении спутников GPS, при этом не гарантируется достоверность закладываемых коэффициентов, и в случае отсутствия данных, получаемых со спутников GPS, формула (1) не может быть использована, так как в системе ГЛОНАСС, основанной на сигналах с частотным разделением, не предусмотрена передача этих коэффициентов. Заметим, что в новых сигналах ГЛОНАСС с кодовым разделением L1OC и L3OC используется модель ионосферы и будут передаваться соответствующие параметры.

В СДКМ-КФД реализуется оценка ионосферной задержки $\hat{I}_G$ в точке сетки следующим образом:

$$\hat{I}_G = \left(\sum_{k=1}^K \left(\frac{I_i}{\varepsilon_i^2} \right) / \sum_{k=1}^K \left(\frac{1}{\varepsilon_i^2} \right) \right). \quad (3)$$

При этом в СДКМ-КФД для расчета весовых коэффициентов точек прокола при привязке к точке сетки используется наиболее распространенная модель ионосферы — IRI (International Reference Ionosphere) [7]. В модель IRI в качестве входного параметра передается усредненный за последний год индекс солнечной активности (число Вольфа). Окончательная дисперсия точки прокола ионосферы определяется по формуле (4):

$$\varepsilon_i = \left(\frac{\sqrt{\sigma_{\text{IPP}}^2 + \Delta i_{\text{IPP-RCV}} + d_{\text{Nominal}}}}{f} \right)^2 + \bar{\sigma}_{\text{IPP}}^2, \quad (4)$$

где σ_{IPP}^2 — дисперсия значения точки прокола, $\Delta i_{\text{IPP-RCV}}$ — дисперсия изменения значения ионосферы в точке прокола с момента вычисления d_{Nominal} — различие значений ионосферы в точке прокола и точке сетки по модели IRI, $\bar{\sigma}_{\text{IPP}}^2$ — дисперсия значения точек прокола, которые принимают отрицательное значение, $f = 2^{-\left(\frac{d}{2D}\right)^2}$, коэффициенты d и D определяются как и в формуле (1).

Формирование сетки вертикальных ионосферных задержек является одной из основных задач

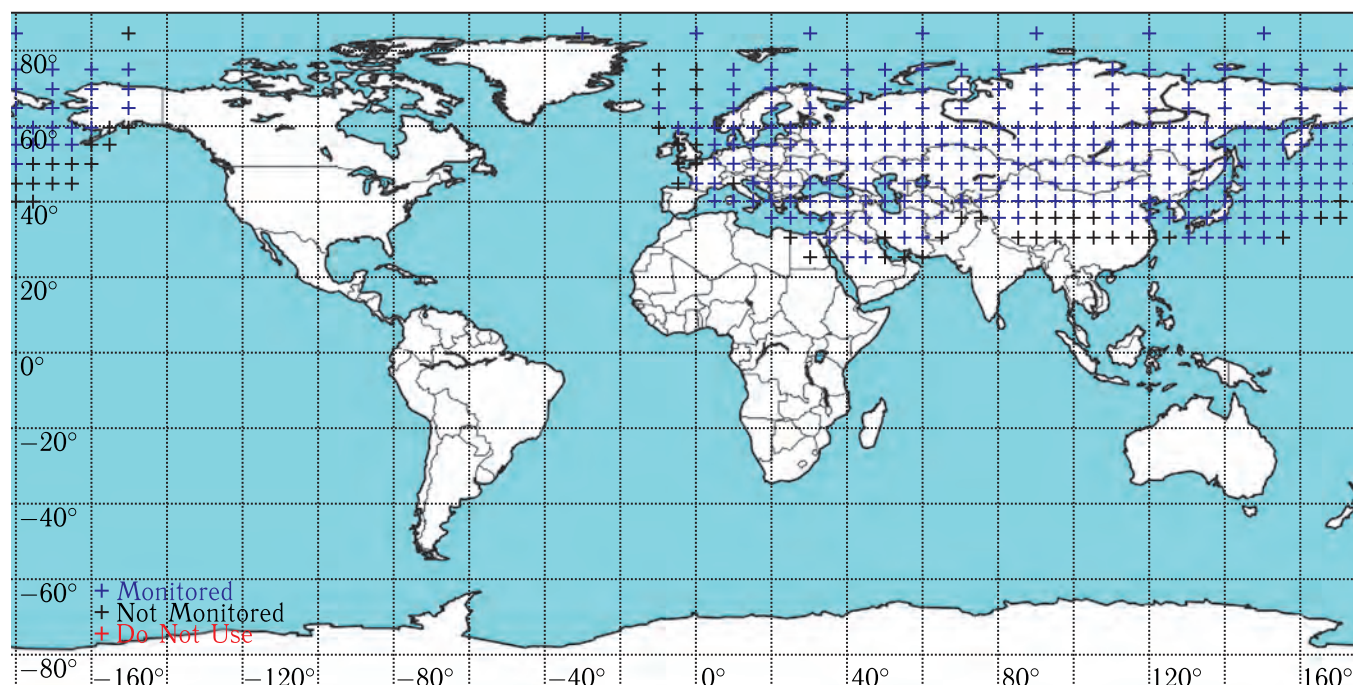


Рис. 2. Карта узлов ионосферной сетки СДКМ–КФД

СДКМ–КФД в части обеспечения точности и контроля целостности. Комплекс обработки данных вырабатывает ионосферные поправки (ионосферная сетка), которые можно использовать в любой точке региона, обслуживаемого системой СДКМ–КФД. На рис. 2 показана карта, на которой изображены

узлы ионосферной сетки, формируемые системой СДКМ–КФД.

Общая блок-схема работы алгоритма определения сетки ионосферных задержек представлена на рис. 3.

Результат применения алгоритма расчета ионосферной задержки в системе СДКМ–КФД

На рис. 4 красным цветом показан результат разности значений ионосферной задержки в точке с координатами 45° с. ш., 55° в. д., вычисленных по алгоритму, реализуемому в WAAS, и значений в финальной версии глобальной ионосферной карты IGS (International GNSS Service) [8] в зависимости от времени. Аналогично синим цветом показан результат разности значений, вычисленных по алгоритму, реализуемому в СДКМ–КФД, и значений IGS. Вычисления производились на интервале 7 суток с дискретностью 5 минут. Таким образом, данный график отражает точность вычисления значения ионосферной задержки путем сопоставления результирующего значения с полученным в финальной версии глобальной ионосферной карты IGS.

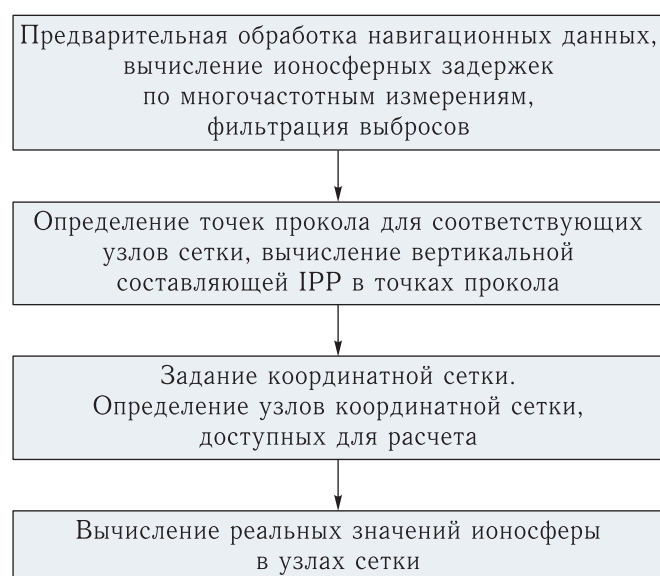


Рис. 3. Общая блок-схема алгоритма вычисления ионосферной задержки в узлах ионосферной сетки

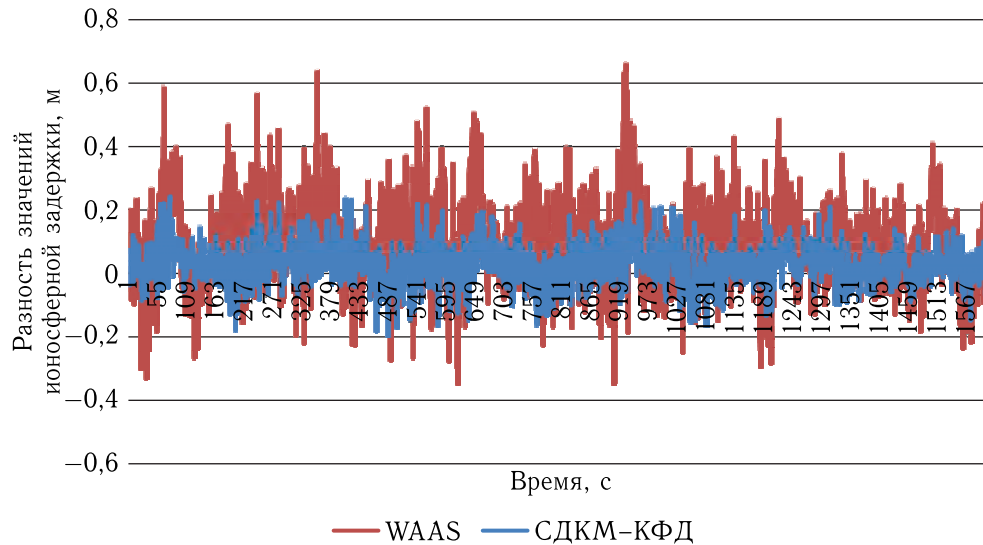


Рис. 4. Разности значений ионосферной задержки, вычисленной по алгоритмам WAAS и СДКМ-КФД, и значений глобальной ионосферной карты IGS в точке с координатами 45° с. ш., 55° в. д.

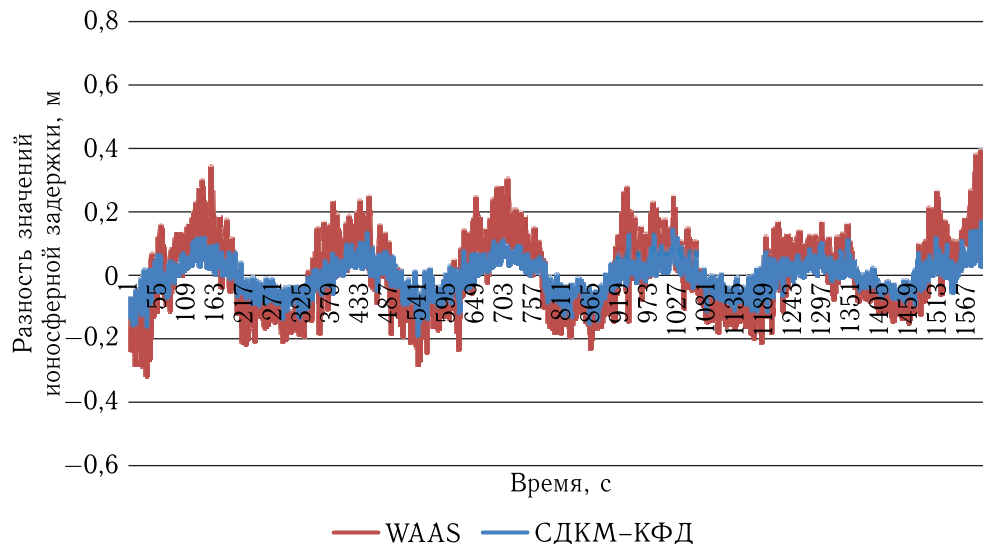


Рис. 5. Разности значений ионосферной задержки, вычисленной по алгоритмам WAAS и СДКМ-КФД, и значений глобальной ионосферной карты IGS в точке с координатами 65° с. ш., 60° в. д.

Было проведено еще несколько аналогичных экспериментов для двух других точек на поверхности Земли. На рис. 5 и 6 представлены результаты для точек, расположенных севернее и южнее предыдущей соответственно.

По результатам проведенного эксперимента в точке с координатами 45° с. ш., 55° в. д. было получено, что дисперсия разности значений ионосферной задержки, вычисленной по алгоритму WAAS, составляет $0,02 \text{ м}^2$, а по алгоритму, реализованному в СДКМ-КФД, — $0,004 \text{ м}^2$. Таким

образом, можно сказать, что алгоритм, реализуемый в системе СДКМ-КФД, обеспечивает точность определения значения ионосферы, характеризующую дисперсией, выше, чем у WAAS, по крайней мере в 5 раз на территории Российской Федерации. Аналогичный показатель, полученный для точки на поверхности Земли, расположенной севернее, составляет 4 раза, а для точки южнее — 8 раз. Из этого можно сделать вывод, что использование алгоритма, реализованного в системе СДКМ-КФД, позволяет повысить точность привязки точки

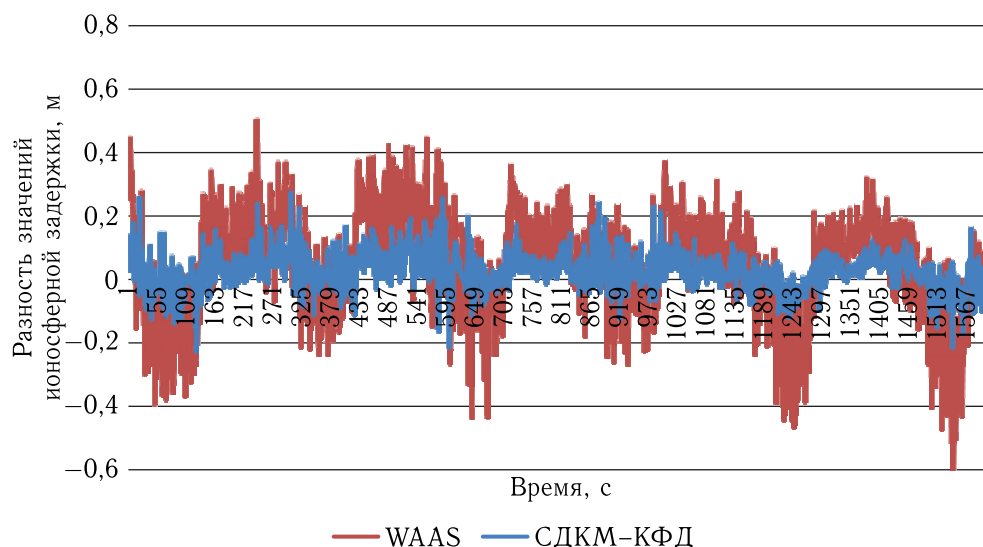


Рис. 6. Разности значений ионосферной задержки, вычисленной по алгоритмам WAAS и СДКМ-КФД, и значений глобальной ионосферной карты IGS в точке с координатами 40° с. ш., 100° в. д.

прокола к точке сетки и, как следствие, повысить точность навигационных определений. При этом эффективность приведенного алгоритма более выражена в южных широтах из-за относительной изначальной стабильности ионосферы в северных широтах.

Заключение

В данной статье был проведен анализ алгоритма вычисления ионосферной задержки в узлах ионосферной сетки, используемого в системе функционального дополнения WAAS. Были определены недостатки его применения в случае, когда потребитель находится на территории Российской Федерации, и был предложен альтернативный метод расчета ионосферной задержки в узлах ионосферной сетки. Из результатов применения предложенного в статье алгоритма и сравнения полученных значений ионосферной задержки с финальной версией глобальной ионосферной карты IGS, видно, что алгоритм, реализуемый в системе СДКМ-КФД, обеспечивает более высокую точность определения значения ионосферы на территории Российской Федерации, чем используемый в системе WAAS, особенно в южных широтах, что позволяет повысить точность навигационных определений.

Исследование повышения точности навигации с использованием представленного алгоритма является предметом дальнейшего рассмотрения.

Список литературы

1. Сернов В.Г., Вовасов В.Е. Высокоточное позиционирование с использованием СКДМ // Новости навигации, 2018, № 3. С. 13–16.
2. Chao Y. Real-time implementation of the wide area augmentation system for the global positioning system with an emphasis on ionospheric modeling. UMI Company, June, Ann Arbor, USA, 1997.
3. Kaplan E., Hegarty C. Understanding GPS: principles and applications. Artech house, 2005.
4. Мальцев Г.Н., Ильин А.В. Форматы передачи данных о состоянии ионосферы по каналам системы дифференциальной коррекции и мониторинга // Метеорологический вестник, 2014, т. 6, № 1. С. 61–68.
5. Shau-Shiun J., Shih-Chieh L. Implementation and Evaluation of the WADGPS System in the Taipei Flight Information Region, Sensors, 2010, vol. 10. P. 2995–3022.
6. Klobuchar J. A. Design and Characteristics of the GPS ionospheric Time Delay Algorithm for Single Frequency Users // Proceedings of IEEE Position Location and Navigation Symposium, Las Vegas, NY, Nov. 1986.
7. International Reference Ionosphere: [сайт]. <http://irimodel.org> (Дата обращения 27.01.2022).
8. International GNSS Service: [сайт]. <http://www.igs.org> (Дата обращения 27.01.2022).