

УДК 532.5

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГНСС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАЗЕМНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ДОПОЛНЕНИЙ ПУТЕМ УЧЕТА СВОЙСТВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ В АТМОСФЕРЕ

Г.В. КРИНИЦКИЙ¹, М.Д. ЛЕОНОВА¹, Е.Н. ЮРАСОВА¹

¹«ОАО МКБ «Компас», г. Москва, Россия

Рассматривается способ повышения эксплуатационных характеристик ГНСС с использованием наземных функциональных дополнений путем учета свойств распространения радиосигналов в атмосфере. Трансляция значений полного электронного содержания (ПЭС), определенного путем двухчастотных измерений, позволяет передавать поправки по всем доступным типам навигационных сигналов GLONASS и GPS, укладываясь в стандартный объем передаваемой информации, регламентируемый ИКАО, что было бы невозможно при традиционных методах передачи корректирующей информации. За счет увеличения количества используемых навигационных сигналов повышается эксплуатационная готовность GBAS. Поправки, измеренные дифференциальной станцией для одной пары сигналов в различных диапазонах частот (например, L1OF и L2OF), можно использовать для повышения точности определения местоположения по другим навигационным сигналам (например, L2OC). Трансляция ПЭС также позволяет снизить погрешности GBAS, вызванные возмущениями в ионосфере, путем коррекции дифференциальных поправок на величину разности между ПЭС, измеренной станцией и потребителем при использовании двухчастотного НАП на борту потребителя. Предложенный метод позволяет обнаруживать сильные локальные неоднородности в ионосфере и, соответственно, повышать целостность навигационных определений.

Ключевые слова: спутниковая навигация, гражданская авиация, наземное функциональное дополнение, распространение радиосигналов, полная электронная концентрация.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время аппаратура спутниковой навигации широко используется в военной и гражданской авиации, при этом в гражданской авиации спутниковые системы используются как основное радиотехническое средство навигации.

Согласно проектам по развитию глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) существуют, а также планируются к внедрению множество видов сигналов навигационных космических аппаратов (НКА) с различной центральной частотой и шириной спектра. Один НКА может излучать в эфир более 5 сигналов в трех частотных диапазонах одновременно. При этом навигационная аппаратура потребителей (НАП) может функционировать с использованием данных сигналов в различных комбинациях. С целью повышения эксплуатационных характеристик (точность, эксплуатационная готовность, непрерывность обслуживания, целостность) навигационных систем в настоящее время проводится внедрение наземных функциональных дополнений. Работа наземных функциональных дополнений ГНСС основана на следующем принципе: антенны опорных приемников располагаются в геодезически привязанных точках, и по измеренным навигационным параметрам (псевдодальности, псевдоскорости и др.) производится вычисление поправок, которые по радиоканалу передаются на объект, например, воздушное судно (ВС). На ВС они учитываются бортовой НАП с целью повышения точностных и других эксплуатационных характеристик.

Международной организацией гражданской авиации ИКАО (от англ. ICAO – International Civil Aviation Organization) разработаны стандарты на наземные и космические функциональные дополнения, направленные на совершенствование характеристик спутниковых приемников, что позволяет использовать их как средства навигации при категорированной посадке.

Работы по созданию локальных наземных дифференциальных подсистем гражданского применения (GBAS) активно проводятся зарубежными фирмами Honeywell, Selex, Indra, Thales, ParkAir. В РФ для гражданского применения НППФ «Спектр» разработана система ЛККС-2000.

МЕТОДЫ, МЕТОДОЛОГИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно рекомендациям ИКАО, работа локальных контрольно-корректирующих станций (ЛККС) осуществляется по сигналам GPS (с кодовым разделением) [1] и ГЛОНАСС (с частотным разделением) [2] в диапазоне L1.

С целью повышения устойчивости к индустриальным и преднамеренным помехам, а также иным факторам, способным сделать прием сигналов ГНСС в используемом диапазоне невозможным, необходимо обеспечить работу НАП и ЛККС по всем доступным типам навигационных сигналов в системах ГЛОНАСС и GPS. Для обеспечения НАП дифференциальными поправками по всем видам навигационных сигналов необходимо ввести новый тип сообщения, передаваемого локальной наземной дифференциальной подсистемой, который будет транслировать поправки к псевдодальностям для захода на посадку по категории I и II для типов сигналов L1OC [3], L2OF, L2OC, L3OC, L2C GPS, L5 GPS [4].

Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации устанавливает параметры канала радиосвязи, применяемые для передачи поправок на борт ВС [5]. Система многопользовательского доступа с временным разделением каналов базируется на кадрах и временных интервалах. Длительность каждого кадра составляет 500 мс. Кадр мультиплексируется по времени таким образом, чтобы он состоял из восьми отдельных временных интервалов (A–H) длительностью 62,5 мс. В каждом установленном временном интервале содержится не более одного пакета. Длина передачи указывает общее число передаваемых битов.

Минимальная частота радиопередачи сообщений о поправках к псевдодальностям для захода на посадку составляет 1 раз за кадр.

Максимальный объем передаваемой информации, предусмотренный форматом блока сообщения GBAS [5], составляет 1696 бит сообщений в одном временном интервале. Даже при условии задействования всех временных интервалов при внесении поправок к псевдодальностям для каждого излучаемого сигнала, данные сообщения занимают 13096 бит из 13568 возможных, что не позволит разместить в кадре другие необходимые сообщения (информацию о GBAS, информацию о конечном участке захода на посадку, прогнозируемую готовность дальнего источника).

Соответственно, пропускная способность канала недостаточна для передачи корректирующей информации для всех излучаемых сигналов. Существуют два варианта, в которых возможно решить данную проблему: увеличение пропускной способности канала или уменьшение объема передаваемой информации. Увеличение пропускной способности требует изменения существующего стандарта и замены бортовых приемников, а также наземных передающих устройств, поэтому следует рассмотреть возможность сокращения объема передаваемой информации.

Суммарная поправка к псевдодальности рассчитывается согласно [6]:

$$\Delta P = R - P = \tau + \Delta s_{\text{ион}} + \Delta s_{\text{троп}} + \varepsilon + Q + m, \quad (1)$$

где ΔP – поправка псевдодальности, R – псевдодальность расчетная, псевдодальность измеренная, τ – погрешность часов спутника, $\Delta s_{\text{ион}}$ – задержка в ионосфере, $\Delta s_{\text{троп}}$ – задержка в тропосфере, ε – погрешность эфемерид, Q – шумы приемника, m – погрешности, связанные с многолучевостью.

Для заданного НКА погрешности τ , ε , m будут равными для всех типов излучаемых сигналов [7]. Задержка сигнала в тропосферном слое Земли $\Delta s_{\text{трон}}$ [8], не зависит от частоты сигнала:

$$\Delta s_{\text{трон}} = \Delta s_d + \Delta s_v = k_1 R_d \int_0^L \rho dl + \int_0^L \left(k_2' R_v + \frac{k_3 R_v}{T} \right) \rho_v dl \quad (2)$$

где Δs_d – гидростатическая часть пространственной задержки сигнала, Δs_v – пространственная задержка сигнала, обусловленная распространением радиоволн в водяном паре, ρ_v – плотность водяного пара, ρ – плотность воздуха, L – расстояние, пройденное сигналом, l – путь вдоль траектории радиолуча, R_d – парциальное давление сухого воздуха, R_v – парциальное давление водяного пара, k_1, k_2, k_3, k_2' – коэффициенты [6].

$$R_d = 287,054 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}, \quad R_v = 461,526 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}, \quad k_1 = 7,76 \cdot 10^{-7} \frac{\text{К}}{\text{Па}},$$

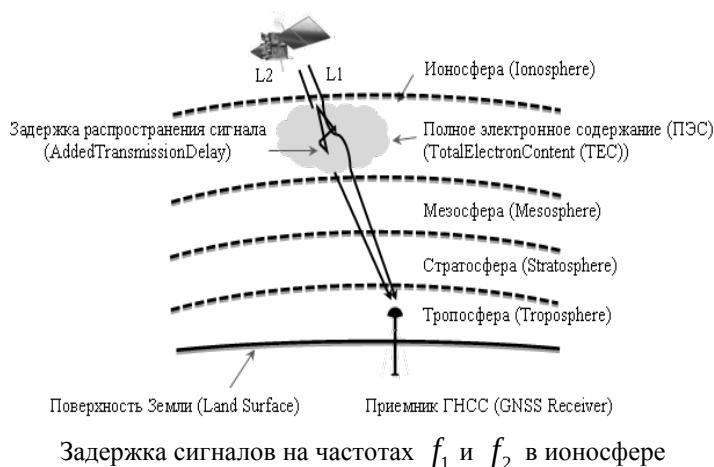
$$k_2 = 7,04 \cdot 10^{-7} \frac{\text{К}}{\text{Па}}, \quad k_3 = 3,739 \cdot 10^{-3} \frac{\text{К}^2}{\text{Па}}, \quad k_2' = k_2 - k_1 \cdot \frac{R_d}{R_v}. \quad (3)$$

Разность задержек сигналов на частотах f_1 и f_2 , приходящих с одного спутника, будет обусловлена задержкой сигнала в ионосфере $\Delta s_{\text{ион}}$:

$$\Delta s_{\text{ион}} = \frac{40,3 \cdot E}{f^2}, \quad (4)$$

где E – полное электронное содержание. Разность времени распространения сигналов от навигационных спутников систем ГЛОНАСС и GPS до НАП на двух частотах f_1 и f_2 пересчитывается в задержку распространения сигнала $\Delta s_{\text{ион}}$ от каждого НКА при прохождении ионосферы [9].

Рисунок иллюстрирует, что частотно зависимой составляющей суммарной поправки к псевдодальности является задержка сигнала в ионосфере.



Ионосферой называют пограничную часть атмосферы Земли, в которой уровень ионизации достаточно велик, чтобы оказывать заметное влияние на распространение радиоволн. Ниж-

ная граница ионосферы располагается на высоте 50–60 км, верхняя на уровне порядка 1000 км переходит в плазмосферу или другие магнитосферные плазменные образования.

Нерегулярные изменения параметров ионосферы (концентрация электронов, ионный состав, температура) связаны с воздействием частиц и излучений, возникающих во время солнечных или магнитосферных вспышечных событий. Внезапные ионосферные возмущения (Sudden Ionospheric Disturbances, SID) вызываются всплеском рентгеновского излучения, генерируемого на Солнце во время хромосферных вспышек. Радио просвечивание атмосферы с помощью сигналов спутниковых радионавигационных систем и сети наземных станций является легкодоступным и не требующим больших затрат способом мониторинга ионосферы в реальном времени.

Просвечивание атмосферы двухчастотными радиосигналами основано на существовании явления дисперсии радиоволн микроволнового диапазона в электронной плазме, образующей ионосферу Земли. Индекс рефракции радиосигнала при прохождении через атмосферу от передатчика, расположенного на спутнике, определяется следующим образом [6]:

$$n = 1 + 40,3 \frac{n_e}{f^2}, \quad (5)$$

где f – несущая частота, n_e – концентрация электронов.

Полное электронное содержание (ПЭС) является одной из важнейших характеристик ионосферы Земли, однако на сегодняшний день на территории России в глобальном масштабе его мониторинг не осуществляется. Аналитические модели дают хорошую оценку этого параметра при условии спокойной геомагнитной обстановки, но в случае возмущенной ионосферы оценка ПЭС становится существенно менее точной, что негативно сказывается на работе различных (в частности навигационных) спутниковых систем.

Значение ПЭС вдоль луча визирования от фазового центра антенны приемника на антенну передатчика пропорционально разности набегов фазы на двух частотах. Учитывая, что фазовая скорость равна по знаку и противоположна по величине групповой скорости, нетрудно видеть, что ПЭС пропорционален разности псевдодальностей, определяемых из навигационных сигналов на двух частотах. Не трудно понять, что для фазовых измерений параметр ПЭС может быть определен лишь с точностью до постоянной (в пределах одного сеанса) константы. Стоит отметить также, что измерения сдвига фазы на несколько порядков точнее кодовых измерений псевдодальности, поэтому для определения абсолютного ПЭС удобнее всего использовать кодовые и фазовые измерения совместно.

Двухчастотный метод измерения ПЭС [10]:

$$E = \frac{f_1 f_2 (L_{изм(2)} - L_{изм(1)}) \left[\left(1 - \left(\frac{Re \cdot \cos \beta}{Re + h_{\max}} \right)^2 \right) \right]^{0,5}}{40,3 (f_2^2 - f_1^2)}, \quad (6)$$

где E – ТЕС; f_1, f_2 – рабочие частоты; $L_{изм(2)}, L_{изм(1)}$ – псевдодальности; Re – радиус Земли; $h_{\max}$ – высота максимальной электронной плотности ионосферы; β – угол возвышения спутника.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Трансляция значения ПЭС, определенного путем двухчастотных измерений, позволяет снизить погрешности GBAS, вызванные возмущениями в ионосфере, путем коррекции дифференциальных поправок на величину разности между ПЭС, измеренной станцией

и потребителем при использовании двухчастотного НАП на борту потребителя, как показано ниже:

$$\Delta P_{\text{нап}} = \Delta P_{\text{ЛККС}} + 40,3 \left(\frac{E_{\text{нап}}}{f_{\text{нап}}^2} - \frac{E_{\text{ЛККС}}}{f_{\text{ЛККС}}^2} \right), \quad (7)$$

где $\Delta P_{\text{ЛККС}}$ – транслируемое значение поправки, измеренное по навигационному сигналу с центральной частотой $f_{\text{ЛККС}}$; $E_{\text{ЛККС}}$ – значение ПЭС, измеренное ЛККС; $E_{\text{нап}}$ – значение ПЭС, измеренное бортовой НАП; $\Delta P_{\text{нап}}$ – скорректированная дифференциальная поправка.

При существенном расхождении значений $E_{\text{ЛККС}}$ и $E_{\text{нап}}$ следует исключить сигнал от данного НКА. Предложенный метод позволяет следующее.

1. Обнаруживать сильные локальные неоднородности в ионосфере и, соответственно, повысить целостность навигационных определений.

2. При работе по сигналам ГЛОНАСС К2 использовать поправки $E_{\text{ЛККС}}$, измеренные дифференциальной станцией, для одной пары сигналов в различных диапазонах частот (например, L1OF и L2OF) для повышения точности определения местоположения по другим навигационным сигналам (например L2OC) путем коррекции измеренных дифференциальных поправок на величину разности времени распространения сигналов с различной несущей частотой в ионосфере,

$$\Delta P_{\text{нап}} = \Delta P_{\text{ЛККС}} + 40,3 \cdot E_{\text{ЛККС}} \left(\frac{1}{f_{\text{нап}}^2} - \frac{1}{f_{\text{ЛККС}}^2} \right). \quad (8)$$

Соответственно, повышается эксплуатационная готовность за счет увеличения количества используемых навигационных сигналов.

3. Уменьшить объем передаваемой информации до 5904 бит/кадр, поскольку для расчета поправок к псевдодальностям для захода на посадку по категории I и II достаточно использовать только одну пару сигналов в различных диапазонах частот (например, L1OF и L2OF).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Интерфейсный контрольный документ ICD-GPS-200, 1993.
2. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Редакция 5.0, 2002.
3. КА ГЛОНАСС-К2. Структура цифровой информации радиосигналов с кодовым разделением частотных диапазонов L1, L2, L3. Редакция 2, 2015.
4. Перов А.И., Харисов В.Н. ГЛОНАСС: принципы построения и функционирования. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
5. Международная организация гражданской авиации. Международные стандарты и рекомендуемая практика. Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации. Авиационная электросвязь. Том 1. Радионавигационные средства. 6-е изд. 2006.
6. Kaplan D.E., Hegarty C.J. Understanding GPS. Principles and Applications. Second Edition, ARTECH HOUSE, INC., 2006, 723 p.
7. Мониторинг влагосодержания атмосферы с помощью системы ГЛОНАСС/GPS / В.В. Чукин, Е.С. Алдошкина, А.В. Вахнин, С.В. Мостаманди, Т.Т. Нгуен, И.В. Обрезкова // Региональная экология. 2010. № 3 (29). С. 122–126.
8. Вовасов В.Е., Ипкаев Н.Б., Герко С.А. Оценка ионосферной и тропосферной задержки сигнала при использовании одночастотного навигационного приемника // Вестник Юж-

но-уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, кибернетика. 2015. № 1, том 15. 2015.

9. Коршунов Д.Е. Применение спутниковых радионавигационных систем в загоризонтной локации // Молодежь и наука: сборник материалов IX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярска. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013 [Электронный ресурс]. URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/section111.html>

10. Власов А.А., Кузьминых Е.В., Чукин В.В. Оценка способов определения ПЭС в ионосфере // Всероссийские радиофизические научные чтения-конференция памяти Н.А. Арманда. Муром, 2010.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Криницкий Георгий Викторович, соискатель МГТУ ГА, начальник отдела разработок «ОАО МКБ «Компас», электронный адрес: krinitskigv@mail.ru.

Леонова Мария Дмитриевна, инженер-программист I категории «ОАО МКБ «Компас», электронный адрес: leonova.md@mail.ru.

Юрасова Екатерина Николаевна, инженер I категории «ОАО МКБ «Компас», электронный адрес: en.yurasova@yandex.ru.

METHOD OF INCREASE IN OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF GNSS WITH USE OF GBAS BY THE ACCOUNTING OF PROPERTIES OF DISTRIBUTION OF RADIO SIGNALS IN THE ATMOSPHERE

Georgii V. Krinitsky

Moscow Design Bureau Compas, Moscow, Russia, krinitskigv@mail.ru

Marina D. Leonova

Moscow Design Bureau Compas, Moscow, Russia, leonova.md@mail.ru

Ekaterina N. Urasova

Moscow Design Bureau Compas, Moscow, Russia, en.yurasova@yandex.ru

ABSTRACT

A method of improving the navigation system performance parameters with the use of ground functional add-ins in respect of radio signal extension properties in the air is considered in the article. The total electron content values broadcast, determined by double-frequency measurements allows to transmit correction data by all available types of GLONASS and GPS navigation signals, keeping within standard information transmitted content, regulated by ICAO, that would have been impossible with the use of standard methods of correcting information broadcast. Due to the increased number of the used navigation signals operating availability of GBAS improves. It is possible to use corrections, measured by a ground station for a pair of signals in different frequency bands (for example L1OF and L2OF) for more accurate positioning on other navigation signals (L2OC). It is also possible to broadcast the differential corrections for all available types of navigation signals GLONASS and GPS and remain in a standard volume of transmitted information, which is regulated by the International Civil Aviation Organization.

Key words: satellite navigation, civil aviation, GBAS, radio communication, ionospheric disturbances, total electron content.

REFERENCES

1. Interface Control Document: NAVSTAR GPS Space Segment. Navigation User Interfaces (ICD-GPS-200).

2. Interface Control Document. Global'naja navigacionnaja sputnikovaja sistema GLONASS [Global navigation satellite system GLONASS]. Revision 5.0, 2002. (in Russian).
3. KA GLONASS-K2. Struktura cifrovoj informaci i radiosignalov s kodovym razdeleniem chastotnyh diapazonov L1, L2, L3 [GLONASS-K2. Structure of digital information of radio signals with code division of frequency ranges L1, L2, L3]. Revision 2, 2015. (in Russian).
4. **Perov A.I., Harisov V.N.** GLONASS principy postroenija i funkcionirovanija [GLONASS principles of construction and functioning]. Izdatel'stvo Radiotekhnika. Moscow, 2010, 800 p. (in Russian)
5. ICAO. International standards and recommended practices. Aeronautical telecommunications. Annex 10 to the convention on international civil aviation. Vol. I (Radionavigation aids). Sixth Edition, 2006.
6. **Kaplan E.D., Hegarty C.J.** Understanding GPS. Principles and Applications. ARTECH HOUSE, 2006, 723 p.
7. **Chukin V.V., Aldoshkina E.S., Vahnin A.V., Mostamandi S.V., Nguen T.T., Obrezkova I.V.** Monitoring vlagosoderzhanija atmosfery s pomoshh'ju sistemy GLONASS/GPS [Monitoring of the atmosphere humidity by means of the GLONASS/GPS system]. Regional'naja jekologija. 2010, № 3 (29), pp. 122–126. (in Russian)
8. **Vovasov V.E., Ipkaev N.B., Gerko S.A.** Estimation ionospheric and tropospheric signal delay for single-frequency SRNS receiver. Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technologies, automatic control, radio electronics, 2015, Vol. 15, no. 1.
9. **Korshunov D.E.** Primenenie sputnikovyh radionavigacionnyh system v zagorizontnoj lokacii [Use of satellite radionavigational systems in a nover-the-horizon location]. Available at: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/section111.html> (accessed 28.04.2015). (in Russian)
10. **Vlasov A.A., Kuz'minyh E.V., Chukin V.V.** Ocenka sposobov opredelenija PJeS v ionosphere [Evaluation of ways of definition of TEC in an ionosphere]. Vserossijskie radiofizicheski nauchnye chtenija-konferencija pamjati N.A. Armanda, Murom, 2010. (in Russian)