

УДК 621.396.98

В.П. Деденок<sup>1</sup>, Ю.В. Резников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харьковский центр ИКИ НАНУ-НКАУ

<sup>2</sup>Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПОПРАВК ДЛЯ АППАРАТУРЫ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ВИДОВОГО НАБЛЮДЕНИЯ

*В представленной работе рассмотрены вопросы применения спутниковых навигационных систем с их дифференциальными дополнениями для высокоточной навигации объектов космического базирования имеющих эллиптический тип орбиты. Показано, что применение традиционных дифференциальных методов к данной категории потребителей не приводит к увеличению достоверности получаемых навигационных решений. Приводится метод оценки высотного распределения электронной концентрации ионосферы, который позволяет получать распределения электронной концентрации не только по планарным координатам, но и по высоте, осуществляется его экспериментальная апробация.*

**Ключевые слова:** спутниковая радиотехническая навигационная система, дифференциальный метод, ионосферная погрешность, эллиптическая орбита.

### Введение

**Постановка проблемы.** В результате бурного развития спутниковых навигационных технологий существенно расширился спектр задач, решаемых при использовании таких спутниковых радиотехнических навигационных систем (СРНС) как GPS и ГЛОНАСС. В то же время появился класс задач, когда существующие характеристики СРНС не позволяют в полной мере обеспечить их решение. В первую очередь это касается задач, требующих высокоточного координатно-временного и навигационного обеспечения [1].

С целью повышения точности навигационных решений в мире широко применяется практика дополнения СРНС дифференциальными подсистемами. Анализ источников, регламентирующих процесс создания таких подсистем [2] показал, что большинство указанных задач могут быть с успехом решены при использовании традиционных дифференциальных методов навигации [1, 2]. Вместе с тем, в силу ряда причин до настоящего времени остается нерешенной задача полной реализации потенциальных возможностей применения дифференциальных методов в интересах космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) как двойного, так и специального назначения [3].

Как правило, для ведения эффективной съемки Земли для КА ДЗЗ специального назначения выбира-

ется эллиптический тип орбиты (например КА КН-12, США). В этом случае возникают трудности применения дифференциальных методов, связанные с тем, что формируемые на земной поверхности поправки включают влияние всей толщи ионосферы (полного электронного содержания), в то время как АСН КА с эллиптической орбитой функционирует в условиях динамически изменяющейся ионосферы, находясь за достаточно короткие интервалы времени и выше и ниже «тяжелых» слоев ионосферы, из-за чего на нее влияет лишь некоторая, постоянно меняющаяся часть полного электронного содержания (ПЭС).

В этих условиях поправки, сформированные традиционным образом не только не улучшают точность навигационных решений, но и привести к ухудшению их качества.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Задача оценки ионосферной погрешности потребителей космического базирования была рассмотрена в ряде работ, в которых предложены некоторые подходы к ее решению. В основу одного из этих подходов, который был разработан в немецком аэрокосмическом центре [4], положено допущение о том, что значения ПЭС, полученные для всей толщи ионосферы, имеют высокую степень корреляции с интегральными значениями, рассчитанными начиная с некоторой произвольно заданной высоты. Практически это позволяет на основе известных

значений ПЭС получать оценки ионосферной погрешности для спутников, имеющих круговую орбиту с малыми значениями эксцентриситета. Такой подход не может быть применим для значительной части потребителей космического базирования, траектория движения которых отличается от движения по круговой орбите (в частности для эллиптических КА ДЗЗ) так как ионосферная погрешность в этом случае оказывается некоррелированной (или слабо коррелированной) со значениями ПЭС в связи с высокой динамикой изменения высоты полета объекта.

Еще одним вариантом оценки ионосферной погрешности указанного класса потребителей может быть использование известных [5] моделей высотного распределения электронной концентрации. Как правило, они представлены в виде полиномов, которые «аккумулируют» в себе некоторое усредненное пространственно-временное распределение параметров ионосферы. Такой подход также имеет существенные ограничения, связанные с тем, что ионосфера является нестационарной и неустойчивой средой, состояние которой может быть описано лишь с точностью до некоторых параметров. Данные параметры определяются факторами глобального и регионального характера и их значения в большинстве случаев точно задать нельзя.

**Формулировка цели статьи.** В связи со всем вышеизложенным для высокоточной навигации КА предлагается использовать метод оценки высотного распределения электронной концентрации ионосферы, который позволяет получать распределения электронной концентрации не только по планарным координатам (широта и долгота) но и по высоте, что в свою очередь позволяет синтезировать алгоритм расчета ионосферных поправок к измерениям аппаратуры спутниковой навигации (АСН) КА, имеющим эллиптический тип орбиты.

### Изложение основного материала

Суть метода состоит в следующем. Осуществляется выбор вида подынтегральной функции (функции описывающей профиль электронной концентрации), т.е. вид этой функции ограничивается в заданном классе функций, при этом значения самой функции определяются с точностью до некоторых неизвестных параметров. За основу берутся модели распределения электронной концентрации по высоте, по сферическим координатам и по времени наблюдения, при этом параметры этих моделей уточняются (оцениваются) в ходе получения текущих измерений характеристик ионосферы. Такой подход позволяет получать дифференциальное (в каждой точке пространства и времени) распределение электронной концентрации, известное до параметров, которые определяются факторами глобального и регионального характера и в основном зависят от солнечной активности. Оценка неизвестных параметров осуществляется на основе обработки первичной ионосферной информации, получаемой пу-

тем приема сигналов спутниковых радионавигационных систем сетью наземных станций, оснащенных двухчастотной АСН.

Оценка применимости данного метода для формирования ионосферных поправок непосредственно к АСН космического базирования была сформулирована следующим образом:

Пусть известны значения псевдодальностей для определенного низкоорбитального КА с функционирующей на его борту двухчастотной АСН, при этом координаты самого КА на момент фиксации данных значений также известны. Помимо этого известны значения псевдодальностей, полученные аппаратурой СРНС наземной контрольной станции (КС), осуществляющей дифференциальную поддержку, для интервалов времени соответствующих прохождению КА в пределах зоны действия данной КС.

Необходимо оценить остаточную ионосферную погрешность и погрешность позиционирования АСН КА при использовании изложенного метода с оценкой параметров модели по измерениям КС.

Наиболее общее представление об ионосфере на перигейном участке трассы КА можно получить, если рассчитать среднее значение ионосферной погрешности. Такая характеристика была рассчитана при использовании модели IRI (рис. 1).

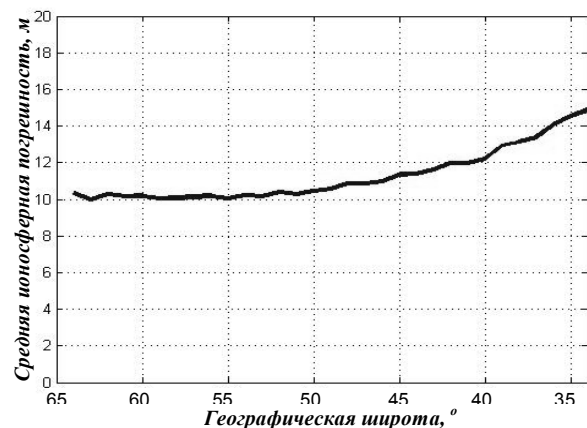


Рис. 1. Среднее значение ионосферной погрешности АСН КА на перигейном участке

Как видно из представленных экспериментальных данных для АСН КА с заданным типом орбиты в среднем ионосферная погрешность на перигейном участке трассы будет составлять значения порядка 10-15 метров (при достаточно высоком уровне солнечной активности), хотя может и превышать данные значения в периоды, когда значения числа Вольфа превышают значение, использованное в эксперименте (150). Несмотря на отсутствие возможности получить измерения аппаратуры АСН КА с эллиптической орбитой тестирование предложенного метода формирования ионосферных поправок возможно с привлечением измерительной базы существующих КА. В данной эксперименте были использованы измерения КА Champ. Экспериментальные данные соответствовали дате 29 июня 2004 года.

Для проведення експеримента по оцінці остаточних погрешностей позиціонування були використані наступні дані:

- вимірні файли супутника Champ, карти CODE;
- навігаційний файл на дані сутки;
- дані про затримки в каналах навігаційних супутників і приймача Champ;
- файл еталонних координат КА Champ.

На рис. 2 представлено середнє значення іоносферної погрешності АСН КА Champ в течение одного періода обертання.

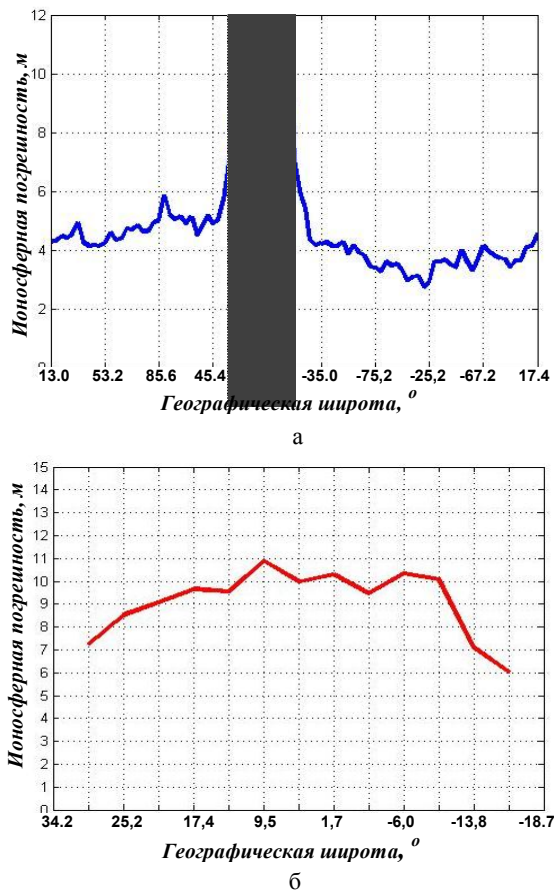


Рис. 2. Реалізація середнього значення іоносферної погрешності: а – на одному витку КА з еліптичною орбітою типу КН-12, б – для виможаного широтного діапазона

Як видно з представленої картини найбільш строго іоносферна погрешність АСН КА Champ відповідає значенням погрешності еліптичного КА на виділеному участку. Відповідно для проведення експеримента по оцінці остаточної погрешності позиціонування був вибраний саме цей просторово-часовий діапазон, коли іоносферні умови для навігаційної апаратури космічного апарату з круговою (КА Champ) і еліптичною орбітою (КА типу КН-12) були максимально близькими.

Методика проведення експеримента складалася в наступному. Для вибраного інтервалу часу  $[t_1, t_2]$  по іоносферним картам CODE производи-

лась оцінка просторово-часового розподілу параметрів іоносфери.

Оцінені параметри використовувалися для встановлення іоносферної погрешності КА Champ на часовому інтервалі, коли траса супутника проходила в заданому діапазоні широт ( $35^\circ \dots -20^\circ$ ). В результаті були отримані статистичні характеристики «невязок» модельних і вимірних значень іоносферної погрешностей на інтервалі  $[t_2, t_3 > t_2]$ . Результати порівняння вимірних і модельних значень представлені на рис. 3

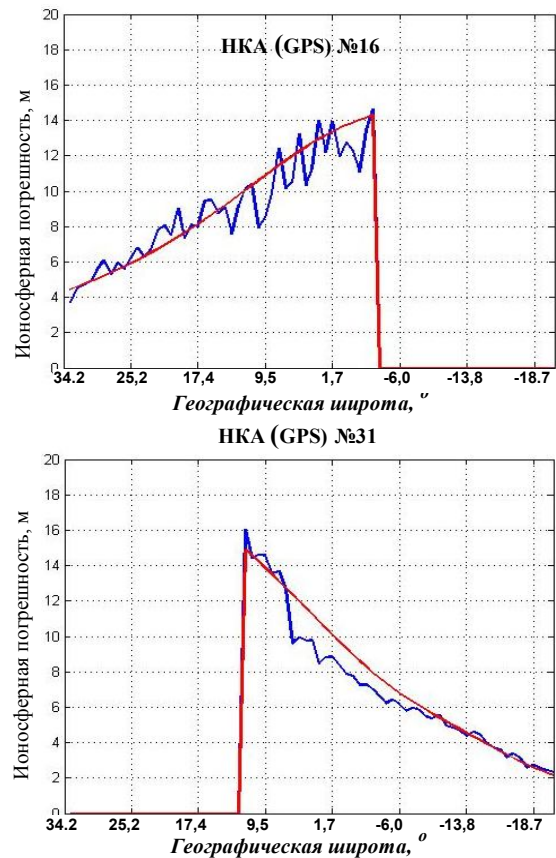


Рис. 3. Іоносферна погрешність, отримана двохчастотним методом (крива №1) і при використанні вказаного методу (крива №2)

«Нев'язки» вимірних і модельних значень іоносферної погрешності КА Champ для всіх навігаційних КА на заданому участку характеризуються наступними величинами: математичне очікування  $\approx 0.05$  м, середньквдратичне відхилення  $\approx 0.62$  м.

В заключительній частині експеримента отримані модельні значення вносилися в вигляді поправок в оцінки псевдодальностей КА Champ, в результаті чого вирішувалася навігаційна задача, т.е. визначалися координати супутника. При цьому було використано два варіанти рішення навігаційної задачі:

- 1) коли сформовані вказаним чином поправки вносилися в значення псевдодальностей;
- 2) рішення навігаційної задачі здійснювалося без внесення якихось іоносферних поправок.

Результат рішення навігаційної задачі для заданого просторово-часового участка представлений на рис. 4.



Рис. 4. Погрешність позиціонування КА Champ

Как видно из представленного рисунка решение навігаційної задачі в тому випадку, коли в оцінку псевдодальностей вводяться відповідні іоносферні поправки має значно нижчий рівень залишкової погрешності позиціонування, як для систематичної, так і для випадкової складової.

## Выводы

Аналіз рис. 4 дозволяє зробити висновок, що при «глобальному» рішенні навігаційної задачі, без внесення іоносферних поправок максимальна по-

грешність позиціонування становить 14 м. В той же час при внесенні відповідних поправок гранична погрешність позиціонування становить 5.5 м. Таким чином, метод формування іоносферних поправок для АСН КА з еліптичним типом орбіти типу КН-12 підвищує точність позиціонування КА на перигейному участку траси в 2.55 рази, що дозволяє ефективно вирішити більшість задач, пов'язаних з обробкою даних дистанційного зондування.

## Список литературы

1. Соловьев Ю.А. Спутниковая навигация и ее приложения. – М.: Эко-Трендз, 2003. – 326 с.
2. Концепція створення та експлуатації системи координатно-часового і навігаційного забезпечення України з застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем на період 2006-2011 роки. – Національне космічне агентство України, 2005. – 31 с.
3. Деденок В.П., Резніков Ю.В. Пути повышения точности определения траектории космических и баллистических объектов с использованием бортовой аппаратуры спутниковой навигации // Системы обработки информации. – X.: ХВУ, 2004. – Вып. 10(38). – С. 32-37.
4. Montenbruck O., Gill E., Ionospheric Correction for GPS Tracking of LEO Satellite // United Kingdom: The journal of navigation, №55 2002. – P. 293-304.
5. Bilitza D., Koblinsky C., Beckley B., Zia S., Williamson R.; Using IRI for The Computation of Ionospheric Corrections for Altimeter Data Analysis; Adv. Space. Res. Vol. 15/2, 113-119(1995).

Поступила в редколлегию 10.07.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил, им. И. Кожедуба, Харьков.

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ФОРМУВАННЯ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ ПОПРАВОК ДЛЯ АПАРАТУРИ СУПУТНИКОВОЇ НАВІГАЦІЇ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ ВИДОВОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

В.П. Деденок, Ю.В. Резніков

У представленій роботі розглянуті питання застосування супутникових навігаційних систем з їх диференціальними доповненнями для високоточної навігації об'єктів космічного базування що мають еліптичний тип орбіти. Показано, що застосування традиційних диференціальних методів до даної категорії споживачів не приводить до збільшення достовірності отримуваних навігаційних рішень. Приводиться метод оцінки висотного розподілу електронної концентрації іоносфери, який дозволяє отримувати розподіли електронної концентрації не тільки по планарних координатах, але і по висоті, здійснюється його експериментальна апробація.

**Ключові слова:** супутникова радіотехнічна навігаційна система, диференціальний метод, іоносферна погрешність, еліптична орбіта.

## APPLICATION OF METHOD OF FORMING OF DIFFERENTIAL AMENDMENTS FOR THE APPARATUS OF SATELLITE NAVIGATION OF SPACE VEHICLES OF SPECIFIC SUPERVISION

V.P. Dedenok, U.V. Reznikov

In the presented work the questions of application of satellite navigational systems with their differential additions for the high-fidelity navigation of objects of space-based having an elliptic type of orbit. It is noted that application of traditional differential methods to this category of users does not result in the increase of authenticity of the got navigation decisions. A method over of estimation of the height distributing of electronic concentration of ionosphere is brought, which allows to get distributing of electronic concentration not only on co-planar co-ordinates but also on a height, his experimental approbation is carried out.

**Keywords:** satellite radio engineering navigation system, differential method, ionosphere error, elliptic orbit.