

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПОПРАВК ДЛЯ АППАРАТУРЫ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

Деденок В.П.¹⁾, Резников Ю.В.²⁾

¹⁾Харьковский центр ИКИ НАНУ-НКАУ

61166, Харьков, пр. Ленина, 14, к. 610, тел. (057) 702-63-46,

E-mail: kharkov_ikd@ukr.net

²⁾Научный центр Харьковского университета Воздушных Сил

61023, Харьков, ул. Сумская 77/79, тел. (057) 702-01-53

E-mail: ura_reznikov@ukr.net

The results of experimental researches application the method of forming differential correctings amendments are presented for the apparatus of satellite navigation space vehicles, having an elliptic type orbit like «Ionosat».

Введение. На сегодняшний день ионосфера является достаточно изученным предметом науки. Тем не менее, большая часть знаний об ионосферных процессах остается не раскрытой, что связано с ограниченным количеством экспериментальных данных. В первую очередь это касается области ионосферы расположенной за максимумом слоя F2, что объясняется ограниченными возможностями существующих наземных средств зондирования. В этой связи огромный научный интерес представляет собой, разрабатываемый на данный момент в Украине проект «Ионосат», который полностью посвящен исследованию ионосферных процессов. Данный проект предполагает создание орбитальной группировки из трех микроспутников, оснащенных научной аппаратурой. Для создания наибольших возможностей по получению информации для спутников выбрана эллиптическая орбита с начальными условиями – высота перигея 400 км, высота апогея 780 км, что удовлетворяет требования по времени существования спутников (2 года) и высотному поясу исследований ионосферы 200-800 км, при этом к баллистико-навигационному обеспечению космических аппаратов (КА) предъявляются достаточно жесткие требования, что связано с необходимостью высокоточной пространственно-временной фиксации получаемых экспериментальных данных. Обеспечить высокую точность наземными измерительными средствами невозможно, поэтому предполагается использование аппаратуры спутниковой навигации (АСН). Обычно для достижения высокоточных навигационных решений применяются дифференциальные методы навигации, однако в случае использования АСН космического базирования это не приводит к достижению требуемого эффекта, что связано с различной степенью влияния электронной концентрации ионосферы на аппаратуру наземного и космического базирования. Дело в том, 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.

Сущность. В связи с этим 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 АСН КА типа «Ионосат». 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 путем 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 АСН 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 разработанного 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).

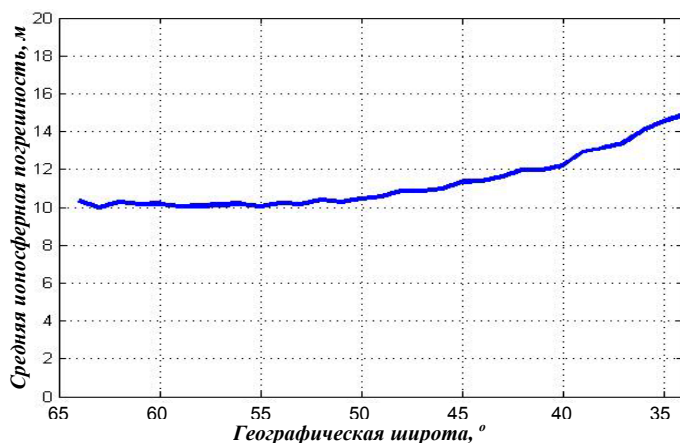


Рис. 1. Среднее значение ионосферной погрешности АСН КА «Ионосат» на перигейном участке полета

Как видно из представленных экспериментальных данных для спутниковой навигационной аппаратуры 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 проведения эксперимента по оценке остаточных погрешностей позиционирования были использованы следующие данные:

- измерительные файлы спутника Champ, карты CODE;
- навигационный файл на данные сутки;

- данные о задержках в каналах навигационных спутников и приемника Champ;
- файл эталонных координат КА Champ.

На рис. 2 представлено среднее значение ионосферной погрешности АСН КА Champ в течение одного периода обращения.

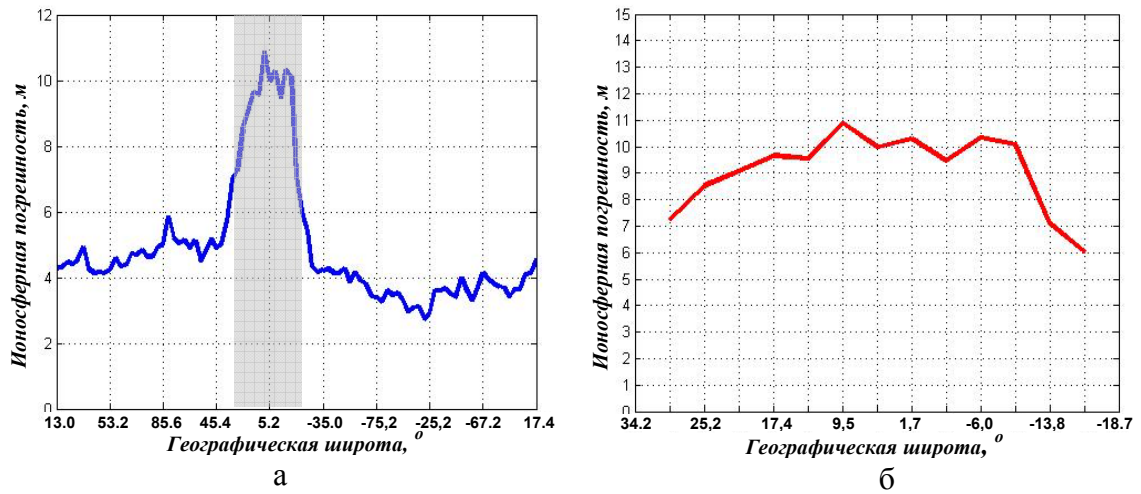


Рис. 2. Реализация среднего значения ионосферной погрешности:
 а – на одном витке КА ДЗЗ с эллиптической орбитой типа КН-12,
 б – для требуемого широтного диапазона

Как видно представленного рисунка наиболее строго ионосферная погрешность АСН КА Champ соответствует значениям погрешности эллиптического КА на выделенном участке. Соответственно для проведения эксперимента по оценке остаточной погрешности позиционирования был выбран именно этот пространственно-временной диапазон, когда ионосферные условия для навигационной аппаратуры космического аппарата с круговой (КА Champ) и эллиптической орбитой (КА типа «Ионосат») были максимально близки.

Методика проведения эксперимента состояла в следующем.

Для выбранного интервала времени $[t_1, t_2]$ по ионосферным картам CODE производилась оценка пространственно временного распределения параметров ионосферы. Оцененные параметры использовались для восстановления ионосферной погрешности КА Champ на временном интервале, когда трасса спутника проходила в заданном диапазоне широт ($35^\circ \dots -20^\circ$). В результате были получены статистические характеристики «невязок» модельных и измеренных значений ионосферной погрешностей на интервале $[t_2, t_3 > t_2]$. Результаты сопоставления измеренных и модельных значений представлены на рис.3

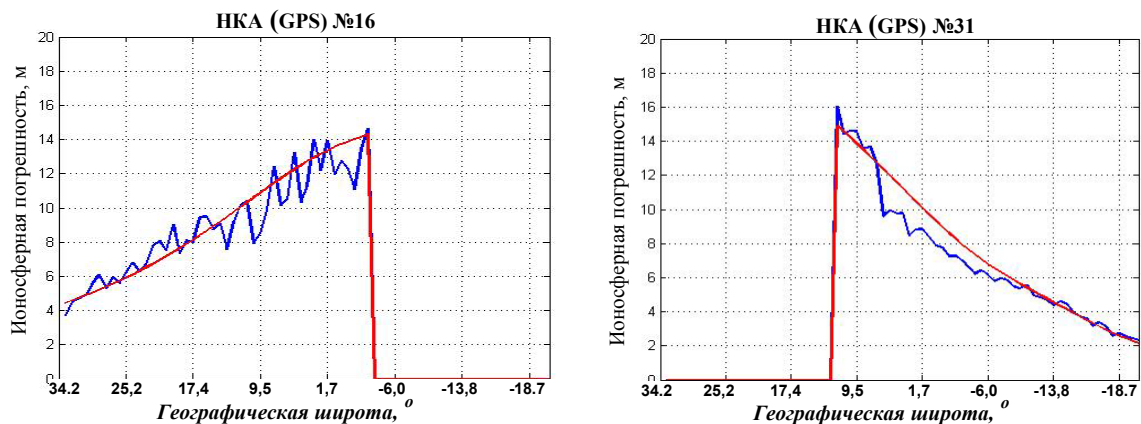


Рис. 3. Ионосферная погрешность, полученная двухчастотным методом (кривая №1) и при использовании изложенного метода (кривая №2)

«Невязки» измеренных и модельных значений ионосферной погрешности КА Champ для всех навигационных КА на заданном участке характеризуются следующими величинами: математическое ожидание ≈ 0.05 м, среднеквадратическое отклонение ≈ 0.62 м.

В заключительной части эксперимента полученные модельные значения вносились в виде поправок в оценки псевдодальностей КА Champ, в результате чего решалась навигационная задача, т.е. определялись координаты спутника. При этом было использовано два варианта решения навигационной задачи:

- 1) когда сформированные указанным образом поправки вносились в значения псевдодальности;
- 2) решение навигационной задачи осуществлялось без внесения каких либо ионосферных поправок.

Результат решения навигационной задачи для заданного пространственно-временного участка представлен на рис. 4.

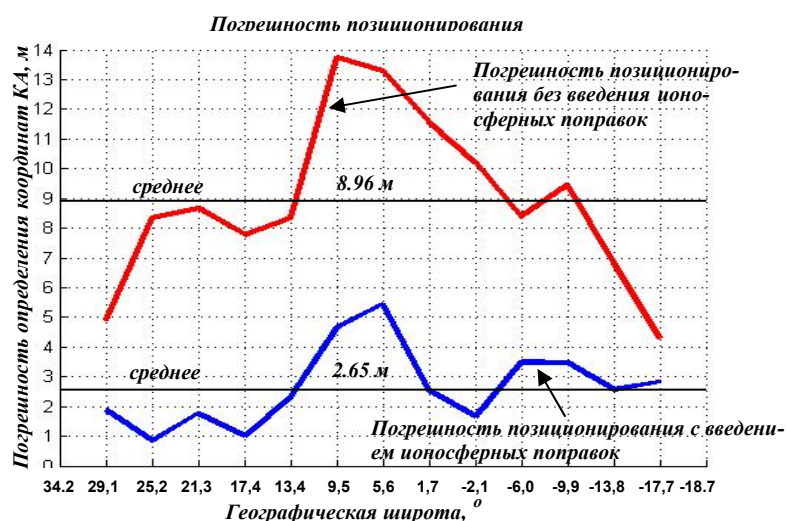


Рис. 4. Погрешность позиционирования КА Champ

Как видно из представленного рисунка решение навигационной задачи в случае, когда в оценки псевдодальностей вносятся соответствующие ионосферные поправки имеет значительно более низкий уровень остаточной погрешности позиционирования, как для систематической, так и для случайной составляющей.

Выводы. Анализ рис. 4 позволяет сделать вывод, что при «лобовом» решении навигационной задачи, без внесения ионосферных поправок максимальная погрешность позиционирования составляет 14 м. В то же время при внесении соответствующих поправок предельная погрешность позиционирования составляет 5.5 м. Таким образом, метод формирования ионосферных поправок для АСН КА «Ионосат» повышает точность позиционирования КА на перигейном участке трассы в 2.55 раза, что позволяет эффективно решить большинство прикладных задач.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ ДО НАЗЕМНОГО ИСТОЧНИКА
РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОЦЕНКИ ТЕКУЩЕГО
СОСТОЯНИИ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ
НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

¹⁾Деденок В.П., ²⁾Ткаченко А.О., ²⁾Власик С.Н., ¹⁾Мигура Е.В.

¹⁾Харьковский центр ИКИ НАНУ-НКАУ

61166, Харьков, пр. Ленина, 14, к. 610, тел. (057) 702-63-46,

E-mail: kharkov_ikd@ukr.net

²⁾Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба

61023, г. Харьков, ул. Сумська 77/79, тел: (057) 704-96-01

E-mail: факс: (057) 704-96-01

The analysis of the accepted ionosphere electronic concentration description model influencing on the estimation of distance from the ground radio transmitter is conducted. It is shown that the account of radio wave refraction in the low layers of ionosphere considerably influences on the radio wave trajectory and allows to promote exactnesses of the distance estimation. Approach to the estimation of current value of sun activity index, which is necessary for practical application of ionosphere description model IRI is offered.

Явление отражения радиоволн короткого диапазона от ионосферы дает возможность решать задачу оценки дальности до наземного радиостанции при его значительном удалении от приемника, в частности, при пеленгации в режиме SSL. Решение такой задачи основано на восстановлении траекторий распространения радиоволн при их отражении от ионосферы.

Строго говоря, ионосфера является изменчивой как во времени, так и в пространстве, при этом траектории радиоволн образуют сложные кривые, изменяющиеся во времени. Это связано с зависимостью электронной концентрации ионосферы N от высоты h , широты f , долготы λ , времени суток t , солнечной активности (которая может быть задана одним из параметров солнечной активности – числом Вольфа q). Сложный вид зависимости обуславливает многообразие путей распространения (отражения) радиоволн, поэтому точность восстановления траекторий радиоволн зависит от точности модели, описывающей текущее состояние ионосферы. В настоящее время наиболее полной и точной моделью, описывающей пространственно-временное распределение электронной концентрации в ионосфере Земли, можно считать модель IRI, которая является общепризнанной глобальной моделью ионосферы, в которой при построении профилей $N(h)$ используются модели распределения N отдельных слоев ионосферы (D , E , F_1 , F_2), которые стыкуются между собой с использованием экспериментальных данных для промежуточных диапазонов высот между слоями и в верхней ионосфере

$$N(h) = N_{iri}(f, \lambda, h, t, q).$$

При практическом решении задач восстановления траекторий радиоволн считается, что достаточно представления функции $N(h)$ с одним главным максимумом и описанием нижней ионосферы (в которой происходит отражение радиоволн) параболической моделью

$$N(h) = N_m \left[1 - \left(\frac{h - h_m}{u} \right)^2 \right],$$

где h_m – высота главного максимума ионосферы, N_m – электронная концентрация в главном максимуме, u – толщина нижней ионосферы. Значения N_m , h_m , u определяются из модели IRI. При таком подходе к решению задачи восстановления траекторий радиоволн