

Исследование влияния состояния ионосферы на точность определения местоположения

Research of influence of a condition of an ionosphere on the accuracy of determination of location

Ключевые слова: ионосфера – ionosphere; точность позиционирования – positioning accuracy; спутниковый навигационный сигнал – satellite navigation signal; псевдодальность – pseudo-range.

Рассматривается актуальный вопрос оценки влияния состояния ионосферы на точность определения местоположения. Разработана методика оценки, использующая показания ионозонда и двухчастотного навигационного приемника.

Topical issue of an assessment of influence of a condition of an ionosphere on the accuracy of determination of location is considered. The technique of an assessment using indications ionozonda and a two-frequency navigation receiver is developed.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных факторов, ухудшающих точность определения местоположения, является прохождение спутникового сигнала через слой ионосферы. Как известно, определение местоположения навигационным приемником происходит путем решения навигационной задачи. В качестве исходных данных при решении навигационной задачи используются дальности, точнее, псевдодальности от точки приема до навигационных спутников видимого созвездия.

Слой ионосферы, расположенный на высоте 100 – 500 км над поверхностью Земли, приводит к искажению траектории прохождения луча от прямолинейной, что приводит, в свою очередь, к ошибкам определения псевдодальностей, а это сказывается на результате решения навигационной задачи. Сложность заключается в непредсказуемости и неоднородности слоя ионосферы, отчего прогнозирование ее влияния на точность определения местоположения невозможно.

Поскольку в литературе, посвященной исследованию ионосферы, основное внимание уделено,

МАРТЫНОВА / MARTYNOVA L.

Любовь Александровна

(martynova999@bk.ru)
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
начальник лаборатории,
Федеральное государственное унитарное предприятие
«Государственный научно-исследовательский институт
прикладных проблем»,
Санкт-Петербург

с одной стороны, собственно состоянию ионосферы, влиянию различных факторов на ее состояние, способам оценки состояния ионосферы, а с другой – отсутствие прямого учета ионосферы при определении местоположения, то в связи с этим актуальным является оценка влияния ионосферы на точность определения местоположения.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ, ОСНОВАННОЙ НА ОБРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИИ

Методика базируется на аппаратной и программной составляющих.

Аппаратная составляющая включает в себя использование:

– двухчастотного приемника «Топкон» (производство Япония);

– ионозонда вертикального зондирования;

Программная составляющая включает в себя:

– ионосферную модель IRI-2007, находящуюся в открытом доступе в Интернете;

– разработанный автором программно-аппаратный комплекс технического анализа разностного сигнала вертикального зондирования ионосферы сигналом с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ-сигналом);

– специально разработанную автором математическую модель оценки влияния состояния ионосферы на точность определения местоположения.

ИОНОЗОНД ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В режиме вертикального зондирования ионосферы излучающий блок излучает непрерывный

зондирующий ЛЧМ сигнал с жестко установленными параметрами: начальная частота $f_H=1,8$ МГц, конечная частота $f_K=16$ МГц, скорость изменения частоты $df/dt=100$ кГц/с. Приемный блок принимает отраженные от ионосферы ЛЧМ сигналы в этом же (1,8-16 МГц) диапазоне частот. В ходе приема разностного сигнала формируется wav-файл.

ДВУХЧАСТОТНЫЙ ПРИЕМНИК

Двухчастотный приемник принимает сигналы на двух частотах L_1 и L_2 , и поэтому измерение псевдодальностей не зависит от состояния ионосферы. Это свойство позволяет использовать показания двухчастотного приемника для сравнительного анализа. По результатам измерений сигналов СРНС ионозонд наряду с координатами местоположения выдает псевдодальности, полученные по результатам обработки на частотах L_1 и L_2 .

КОМПЛЕКС ТЕХНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Комплекс технического анализа предназначен для изучения разностного сигнала ионозонда вертикального зондирования ЛЧМ-сигналом. В отличие от имеющихся и описанных [1-6] средств обработки разностного сигнала новым по сравнению с имеющимися методами обработки отраженного сигнала ионозонда является:

- использование скользящего окна при проведении спектрального анализа;
- регистрация пика, возывающегося над «пьедесталом», соответствующего частоте разностного сигнала;
- при проведении корреляционного анализа — использование синусоидального сигнала с частотой, в точности соответствующей частоте отраженного сигнала. Использование построенной таким образом корреляционной функции позволяет получить качественную оценку диффузного влияния ионосферной среды на отражение зондируемого сигнала. В идеальном случае при зеркальном отражении коэффициент корреляции был бы равен единице. Проявление диффузных свойств ионосферы выразим количественной мерой — коэффициентом корреляции.

В ходе приема отраженного сигнала осуществляется пересчет частотно-временной характеристики в высотно-временную.

Таким образом, комплекс технического анализа осуществляет:

- спектральный анализ с использованием преобразований Фурье

$$\hat{f} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-ix\omega} dx \quad (1)$$

— корреляционный анализ, в ходе которого строилась корреляционная функция и определялся коэффициент корреляции:

$$r_{XY} = \frac{\text{cov}_{XY}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2} \sqrt{\sum (Y - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ

Модель воспроизводит орбитальное движение навигационных спутников, определяет видимое созвездие для точки с заданными координатами, из спутников видимого созвездия по максимальному объему геометрической фигуры определяет рабочее созвездие, по которому осуществляется решение навигационной задачи. Решение навигационной задачи производится по полученным псевдодальностям. Разность между истинным местоположением и полученным путем решения навигационной задачи с использованием экспериментально измеренных псевдодальностей и позволяет получить оценку влияния ионосферы на точность определения местоположения.

ПРИНЦИП РАБОТЫ МЕТОДИКИ

По показаниям ионозонда на заданный момент времени для заданной точки местности определяем значение критической частоты и изменение частоты разностного сигнала с течением времени. Осуществляем пересчет разностной частоты в высоту по формуле:

$$t_o = \frac{2H}{c} \quad (3)$$

где H — высота слоя, от которого произошло отражение;

c — скорость распространения радиоволн, равная скорости света в вакууме;

Частота, на которой происходило излучение, определяется по формуле:

$$f = \frac{V_f}{t_o}, \quad (4)$$

где V_f — скорость изменения частоты, равная 100 кГц;

Подставляя (4) в (3) и выражая H , получаем зависимость изменения высоты от частоты разностного сигнала:

$$H = \frac{c}{2} \frac{V_f}{t}. \quad (5)$$

КОСМОС И ИНФОРМАТИКА

Частота зондируемого сигнала связана с концентрацией электронов соотношением:

$$f_p = \sqrt{\frac{e^2 N}{\pi m_e}}$$

$$f_p [\text{MHz}] = 2.84 \sqrt{N [\text{cm}^{-3}] \cdot 10^{-5}} \quad (6)$$

Подставляя вместо f_p частоту зондируемого сигнала, изменяемую в диапазоне от 1,8 МГц до 18,0 МГц, со скоростью 100 кГц, получаем выражение для определения концентрации электронов для текущего значения разностной частоты. Отсюда получаем профиль распределения концентрации электронов по высоте:

$$N = \left(\frac{f_p}{2.84} \right)^2 \cdot 10^5 = \left(\frac{(1.8 + 0.1 * t)}{2.84} \right)^2 \cdot 10^5, \quad (7)$$

где t - время изменения зондируемого сигнала.

Таким образом, с одной стороны, мы имеем изменение H от времени, с другой стороны, имеем изменение плотности концентрации электронов от частоты, зависящей, в свою очередь, от времени. Это означает, что, на один и тот же момент времени известны следующие параметры:

- частота зондируемого сигнала;
- высота слоя, от которого произошло отражение зондируемого сигнала.

Это позволяет построить вертикальный профиль распределения концентрации электронов по высоте.

На следующем этапе исследований целесообразно сравнить полученный результат с результатами моделирования на ионосферной модели IRI-2007.

Подставляя в качестве данных дату, время, координаты места и значение критической частоты, получаем вертикальный профиль распределения концентрации электронов по высоте.

Сравнительный анализ результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований разностного ЛЧМ-сигнала ионозонда можно проводить только для нижней части ионосферы вплоть до критического слоя на высоте H_{kp} , на которой произошло отражение сигнала. Сравнительный анализ позволяет определить взаимное соответствие расчетных и экспериментальных данных.

Дальнейший анализ направлен на определение соответствия ПЭС, полученного экспе-

риментальным и расчетным путем. Для получения экспериментальных данных использовался двухчастотный приемник Торсон производства Япония. С частотой 20 Гц осуществлялась выдача данных по псевдодальностям на частотах L_1, L_2 , а также информация по каждому спутнику: номер спутника, азимут, угол возвышения. Указанная информация позволяла определить полное электронное содержание по всей толщине ионосферного слоя по формуле:

$$TEC(t, \phi, \lambda) = \frac{f_{L_1}^2 \cdot f_{L_2}^2}{f_{L_1}^2 - f_{L_2}^2} \cdot \frac{1}{40.3} \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left[\left(PR_{L_2}^i - PR_{L_1}^i \right) \cdot \sqrt{1 - \left[\frac{R_3}{R_3 + H_{ion}} \right]^2 \cdot \sin \alpha_i} \right] \quad (8)$$

Расчеты с использованием ионосферной модели IRI-2007 позволяют получить ПЭС путем интегрирования вертикального распределения концентрации электронов по формуле:

$$TEC = \int_{H \min}^{H \ max} Nedh \quad (9)$$

или

$$TEC = \sum_{i=1}^n (Ne_i \cdot \Delta h) \quad (10)$$

где Ne_i – концентрация электронов в слое h_i ;
 i – текущий номер слоя ионосферы;

Δh – шаг по высоте, с которым происходил расчет вертикального профиля распределения концентрации электронов; при проведении модельных расчетов шаг задается пользователем.

В ходе анализа должна быть выявлена зависимость соотношения нижнего слоя ионосферы и показателей по всему слою. Если переписать (9) в виде

$$TEC = \int_{H \ min}^{H \ max} Nedh = \int_{H \ min}^{H_{kp}} Nedh + \int_{H_{kp}}^{H \ max} Nedh, \quad (11)$$

то первое слагаемое определяется показаниями ионозонда.

Схема информационных потоков в методике представлена на рисунке 1.

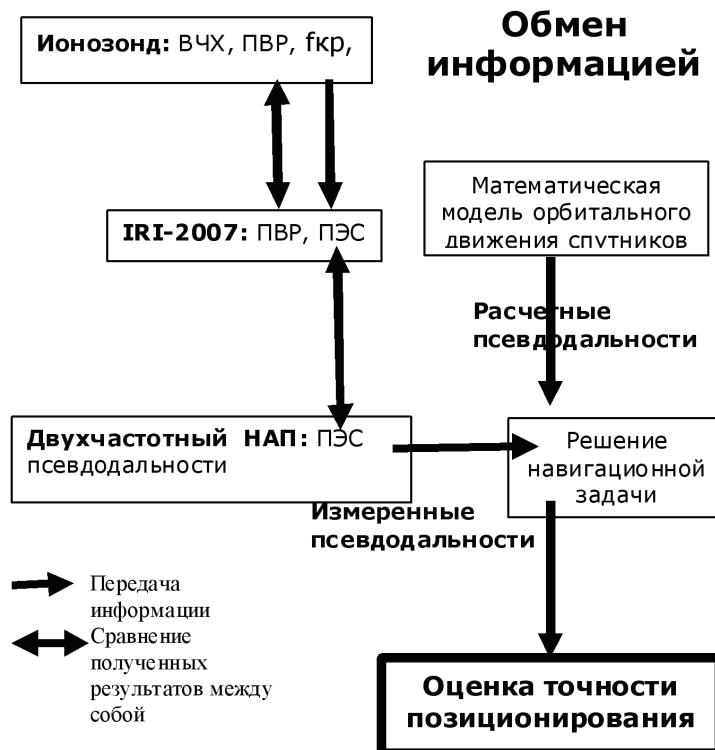


Рис.1. Схема обмена информацией при исследовании влияния состояния ионосферы на точность определения местоположения

При этом, если предположить, что верхний слой соответствует расчетным показателям, то должно выполняться следующее соотношение: если ПЭС нижней части слоя меньше рассчитанного по IRI-2007, то и ПЭС по всему слою также должна получиться меньше, чем рассчитанная по IRI-2007 – в предположении, что верхний слой – одинаковый по расчетным и по экспериментальным данным. Результаты экспериментальных исследований, проведенных с использованием предложенной методики обработки информации для оценки влияния состояния ионосферы на точность определения местоположения, подтвердили правильность высказанного предположения.

ВЫВОДЫ

Разработана методика оценки влияния состояния ионосферы на точность определения местоположения, основанная на обработке информации сигналов спутниковых радионавигационных систем. Математические модели, используемые в методике, программно реализованы, что позволило использовать их при проведении исследований.

Литература

1. Э.Л. Аким, Д.А. Тучин Ионосферная составляющая измерений псевдодальности околоземных космических аппаратов, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, 2004.
2. Зыков Е.Ю., Акурин А.Д., Салаев А.Л., Шерстюков О.Н. Автоматическая интерпретация ионограмм вертикального зондирования. //Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки, том 150, №3, 2008, С. 36–45
3. Иванов В.А., Елсуков А.А. Разработка и испытание однопозиционного вертикального ЛЧМ-ионозонда минимальной мощности передатчика, // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия Радиотехнические и инфокоммуникационные системы, 2011, №1, С.75–80.
4. Елсуков А.А. Синтез и анализ численной модели вертикального однопозиционного ЛЧМ зонда. // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: радиотехнические и инфокоммуникационные системы, 2009, №1, С.12–20
5. Недопекин А.Е., Колчев А.А., Шумаев В.В. Погрешности измерения доплеровского смещения частоты с помощью амплитудно-модулированного ЛЧМ сигнала // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного университета, 2010, №103, С.42–47
6. Лашевский А.Р. Особенности дисперсионного распространения в ионосфере декаметровых рубежно-частотно-модулированных радиосигналов с различной средней частотой спектра. Дис.на соиск.уч.ст. кандидата ф.-м.наук, 2010, С 22.