

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛАСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ СЛУЖБЫ IGS В ЦЕЛЯХ ПОСЛЕСЕАННОЙ КОРРЕКЦИИ GPS-ИЗМЕРЕНИЙ

д.т.н., проф. В.П. Деденок, к.т.н. С.Н. Флерко, Ю.В. Резников

Приведены результаты экспериментальных исследований области практического применения глобальных карт распределения ионосферных параметров, формируемых международной службой IGS.

Постановка проблемы. Развитие спутниковых технологий точного определения координат или, так называемых GPS-технологий, открывает новые возможности и области их практического применения: от навигации объектов до высокоточных кадастровых работ и траекторных измерений. Обработка результатов GPS-измерений может проводиться как в реальном времени, так и после сеанса. При этом послесеансная обработка является наиболее привлекательной за счет достижения более высоких точностных характеристик, что объясняется привлечением высокоточных фазовых измерений первичных навигационных параметров. Фазовые GPS-измерения или измерения по фазе несущей сигналов наряду с низкой инструментальной погрешностью характеризуются наличием неоднозначности, разрешение которой является основным препятствием к их практическому применению. Данная задача решается при использовании разностей измерений (первых, вторых или третьих), выполненных в разнесенных измерительных пунктах, и при минимизации всех возможных погрешностей измерений (нестабильности генераторов, влиянии среды распространения сигналов, эффектов интерференции с переотраженными сигналами и т.п.). Для эффективного решения задачи разрешения неоднозначности уровень всех перечисленных погрешностей должен быть доведен до значения, не превышающего длину волны несущей навигационного сигнала, что в диапазоне L1 системы GPS составляет значение 19,2 см. Как показал **анализ последних исследований и публикаций** [1 – 3], наибольшие проблемы возникают при учете ионосферной погрешности GPS-измерений.

Формулирование целей статьи. Одним из возможных направлений компенсации ионосферной погрешности GPS-измерений является ис-

пользование так называемых ионосферных карт (от английского «ionosphere map»), которые формируются центром CODE международной службы IGS. В настоящее время в службу IGS входит более 350 двухчастотных GPS-станций, распределенных по поверхности всего Земного шара, при этом для формирования глобальных ионосферных карт используются суточные измерения интегральных наклонных ионосферных задержек, полученных на 150 станциях. В результате обработки суточных файлов измерений центр CODE, размещенный в г. Берн, Швейцария, формирует карты состояния ионосферы, которые доступны через сеть Интернет [3] с задержкой в четверо суток. При этом специалисты центра гарантируют точность восстановления профиля электронной концентрации на уровне десятых долей TECU, что в пересчете на дальность составляет значения около единиц сантиметров. Такие характеристики точности полностью удовлетворяют требованиям задач разрешения неоднозначности фазовых измерений. Тем не менее, ионосферные карты предоставляются с дискретностью по времени в 2 часа, а по пространству – около 500 км по долготе и около 250 км по широте с линейной аппроксимацией отсутствующих данных между точками сформированной «решетки», что ставит вопрос об области их возможного практического применения в региональном масштабе для решения высокоточных координатных задач. К таким задачам могут быть отнесены задачи комплекса внешнетраекторных измерений летательных аппаратов при их полигонных испытаниях. Таким образом, **постановка проблемы** заключается в экспериментальной аттестации глобальных ионосферных карт центра CODE для применения в региональном масштабе с использованием результатов измерений реально существующих двухчастотных GPS-станций.

Изложение основного материала исследования. Исходными данными для проведения экспериментальных исследований являлся суточный RINEX файл GPS-станции в Голосеево (Киев, GLSV) и набор из 12 карт, рассчитанных в центре CODE службы IGS. Оцениванию подвергались статистические характеристики отклонений значений параметров ионосферных карт от измеренных значений ионосферных линейных комбинаций станции GLSV, принятых в качестве эталонных.

Двухчастотные ионосферные измерения, полученные на основе кодовых псевдодальностей, формировались на основе следующей модели [2]:

$$\Delta \hat{I} = \left(\left(\hat{S}_{L1} - \hat{S}_{L2} \right) / \left(1 - f_1^2 / f_2^2 \right) \right) + \Delta_c + \Delta_{\text{тр}} + \delta, \quad (1)$$

где $\Delta \hat{I}$ – оценка ионосферной задержки на наклонной трассе; \hat{S}_{L1} , \hat{S}_{L2} – оценки псевдодальностей до навигационного спутника в каналах L1 и L2;

f_1, f_2 – частоты сигналов, Δ_c и $\Delta_{пр}$ – погрешности, обусловленные различным временем прохождения сигнала в каналах L1 и L2 передатчика и приемника соответственно; δ – флуктуационная составляющая погрешности.

Различие времени прохождения сигналов в трактах L1 и L2 каналов передатчика и приемника носит систематический характер и учитывается на основе вспомогательной информации, предоставляемой центром CODE совместно с ионосферными картами. Флуктуационная составляющая представляет собой белый гауссовый шум с нулевым математическим ожиданием и дисперсией порядка 1 м^2 , снижение влияния данной составляющей до уровня величин с дисперсией $0,1 \dots 0,3 \text{ м}^2$ было обеспечено применением алгоритма предварительной обработки данных, подробно изложенном в [4]. При этом методические ошибки фильтрации не превышали значений $5 \dots 10 \text{ см}$.

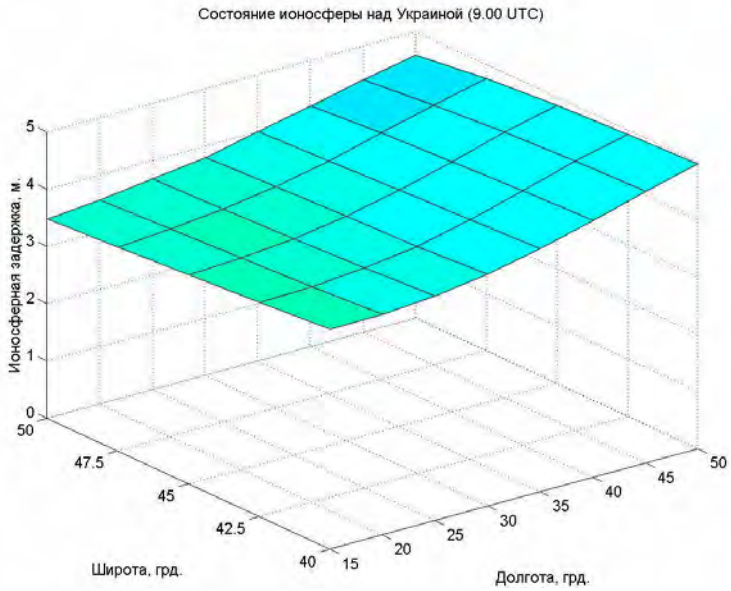
Ионосферные карты представляют собой значения интегральных электронных концентраций в вертикальном направлении от точек сетки с шагом 5° по долготе и $2,5^\circ$ по широте. Иллюстрация фиксированной карты ионосферы в глобальном масштабе и в масштабе географического положения Украины на 3.08.2002 г. приведена на рис. 1.

В то же время двухчастотные кодовые измерения представляют собой значения, оцененные на наклонных трассах «навигационный спутник – GPS-станция». Поэтому для выполнения сравнительных оценок необходимо привести все параметры к единому виду. Так при построении карт предполагается, что ионосферный слой распределен в виде тонкого слоя с максимальной концентрацией электронов. Высота слоя определяется центром CODE и колеблется в пределах высот $350 \dots 450 \text{ км}$. Для расчета вертикальной задержки на требуемой трассе необходимо рассчитать геомагнитные координаты точки пересечения луча сигнала с тонким слоем ионосферы на заданной высоте максимума ионизации. При этом каждая из этих точек попадет внутрь какой-либо ячейки ионосферной сетки с 4 известными значениями электронной концентрации в узлах.

Так как ионосферные карты представлены на фиксированные интервалы времени – 2 часа, то для нахождения требуемых значений на требуемый момент времени необходимо интерполировать значения концентрации – 4 известных значений в фиксированных точках согласно выражения [3]:

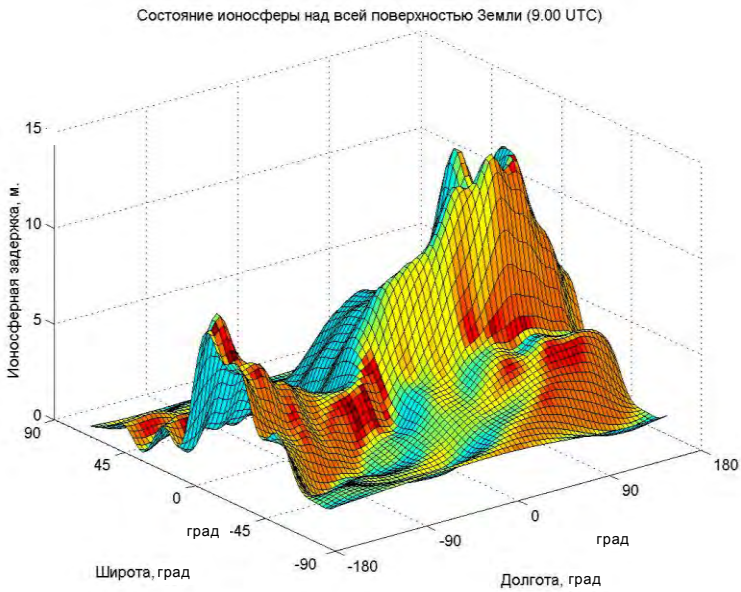
$$E(\beta, \lambda, t) = \frac{T_{i+1} - t}{T_{i+1}} E_i(\beta, \lambda) + \frac{t - T_i}{T_{i+1} - T_i} E_{i+1}(\beta, \lambda), \quad (2)$$

где T_{i+1} и T_i – большее и меньшее значение времени, на которое существует конкретная ионосферная карта, относительно времени определения t ;



$E_i(\beta, \lambda)$ и $E_{i+1}(\beta, \lambda)$ – известные значения концентрации на соответствующие моменты времени.

а)



б)

Рис. 1. Иллюстрация ионосферной карты, фиксированной на 9.00 (UTC):
 а – в глобальном масштабе; б – в региональном масштабе Украины

После интерполяции по времени выполняется интерполяция по координатам из точек сетки на требуемую точку согласно выражения

$$E(\lambda_0 + p\Delta\lambda, \beta_0 + q\Delta\beta) = (1-p)(1-q)E_{0,0} + p(1-q)E_{1,0} + q(1-p)E_{0,1} + pqE_{1,1}, \quad (3)$$

где $0 \leq p < 1$ и $0 \leq q < 1$, а $\Delta\lambda$ и $\Delta\beta$ – величина шага сетки по широте и долготе соответственно (рис. 2).

С другой стороны, измеренные GPS-приемником значения наклонных ионосферных задержек должны быть пересчитаны на вертикальные направления с использованием предварительно выбранной функции наклона

$$F_1 = TEC/VTEC = 1/\cos Z' \quad (4)$$

при $\sin Z' = R \times \sin Z / (R + H_{\text{ион}})$.

где TEC и VTEC – электронная концентрация на наклонной трассе и в вертикальном направлении соответственно; Z' и Z – угол между линией визирования на спутник и нормалью к Земле от точки «прокола» и угол между линией визирования на спутник и нормалью к антенне соответственно; R – радиус Земли; $H_{\text{ион}}$ – высота тонкого слоя ионосферы.

Сравнительный анализ был выполнен за 22 часа для измерений GLSV 3 августа 2002 года. В обработку вовлекались все измерения от спутников с углами места более 10° . Статистические характеристики (математическое ожидание и СКО) ошибок рассчитывались по следующим выражениям:

$$m_x^* = \sum_{i=1}^n x_i / n; \quad (5)$$

$$\sigma_x^* = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x^*)^2 / (n-1)}, \quad (6)$$

где n – количество выполненных измерений; x – величина ошибки.

В табл. 1 приведены статические характеристики ошибок определения ионосферных задержек по ионосферным картам.

Во втором и третьем столбцах показаны максимальные значения ошибок на наблюдаемом интервале, в четвертом столбце – средние значения ошибок за час, в пятом столбце – среднеквадратические отклонения этих ошибок от среднего значения за интервал наблюдения, в ше-

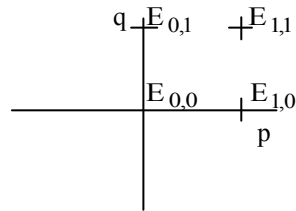


Рис. 2. Двумерная интерполяция

стом столбце – количество обработанных измерений, в седьмом столбце указан процент ошибок, выходящих по величине за пределы 3σ .

Таблица 1

Статистические характеристики ошибок определения ионосферной задержки

Час	Макс. отрицательная ошибка, м	Макс. положительная ошибка, м	Среднее ошибки, Мх, м	СКО ошибки, м	Количество измерений	Ошибки за пределами 3σ , %
1	-2,65	4,95	-0,09	0,55	1106	4,15
2	-0,59	5,56	-0,02	0,48	1278	3,83
3	-0,73	2,12	-0,02	0,34	1337	5,46
4	-0,72	4,18	0,32	0,84	1084	1,01
5	-0,55	3,11	0,25	0,66	808	3,34
6	-0,68	2,60	0,49	0,65	793	0,37
7	-0,46	4,26	0,63	0,75	761	0,78
8	-0,29	5,00	0,51	0,66	747	2,67
9	-0,40	6,68	0,26	0,72	793	2,64
10	-1,46	7,38	0,05	1,12	852	1,87
11	-1,58	4,76	0,08	0,57	1017	2,35
12	-0,40	4,46	0,66	0,56	1059	2,07
13	-0,33	7,44	0,85	0,82	984	0,81
14	-0,51	5,25	0,80	1,13	1080	1,75
15	-0,94	2,26	0,5	0,47	1064	3,38
16	-0,63	2,95	0,80	1,04	1065	0
17	-0,47	2,79	0,59	0,84	964	0
18	-0,45	3,31	0,48	0,42	882	5,1
19	-0,6	4,17	0,67	0,75	780	2,30
20	-0,61	4,95	0,19	0,60	833	3,60
21	-0,63	4,56	0,25	0,60	871	3,44
Σ	-2,65	7,44	0,38	0,77	20465	1,45

Выводы. Суммарные характеристики точности определения ионосферной задержки по картам составляют значения 0,77 м (СКО) при этом 1,45% значений ошибки находятся за пределами интервала 3σ , что в целом можно признать удовлетворительным. Тем не менее указанной точ-

ности явно недостаточно для одночастотных геодезических приложений, когда требуется восстановление ионосферной погрешности с ошибкой, не превышающей длину волны навигационного сигнала (19,2 см). Это объясняется погрешностями интерполяции значений в узловых точках ионосферной решетки на требуемые точки, а также достаточно значимым разносом узловых точек сетки в пространстве для использования в региональном масштабе. Таким образом, для высокоточной коррекции ионосферных погрешностей в региональных масштабах должны быть выбраны другие методы, которые более точно учитывают пространственно временные связи состояния ионосферы в выбранном регионе. Одним из таких методов может быть метод, подробно изложенный в [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Hansen A., Peterson A., Walter T., Enge P. *Correlation Structure of Ionospheric Estimation and Correction for WAAS // ION Nat. Techn. Meeting. – Anaheim, CA. – 9 January 2000. – P. 454 – 463.*
2. Langley R., Fedrizzi M., de Paula E., Kantor I., Santos M. *Mapping the Low-latitude Ionosphere with GPS // GPS Word, February 2002. – Vol. 13. – № 2. – P. 42 – 47.*
3. Schaer S. *How to use CODE's Global Ionosphere Maps. – IGS Position Paper. – IGS Analysis Centers Workshop, May 1997. – 9 p.*
4. Флерко С.Н., Дейнеко В.Н. *Алгоритм предварительной обработки ионосферных линейных комбинаций измерений по сигналам навигационных спутников // Моделювання та інформаційні технології. – К.: ИПМЕ. – Вип. 22. – С. 206 – 210.*
5. Деденок В.П., Флерко С.Н., Дейнеко В.М. *Метод адаптивной компенсации влияния ионосферы на спутниковые навигационные измерения в одночастотной аппаратуре потребителей // Восточно-европейский журнал Передовых технологий. – 2003. – № 5(5). – С. 9 – 12.*

Поступила 5.02.2004

ДЕДЕНОК Виктор Петрович, доктор технических наук, профессор, начальник научного центра при ХВУ. Окончил ВИРТА ПВО в 1975 году. Область научных интересов – адаптивная обработка информации космических систем.

ФЛЕРКО Сергей Николаевич, канд. техн. наук, заместитель начальника НИО научного центра. Окончил ХВУ в 1994 году. Область научных интересов – системы и комплексы спутниковой навигации и геодезии. E-mail: flerko@ukr.net.

РЕЗНИКОВ Юрий Вячеславович, адъюнкт ХВУ. Окончил ХВУ в 2000 году. Область научных интересов – системы и комплексы спутниковой навигации и геодезии.