

## 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,  $\Delta_c$  и  $\Delta_{пр}$  – погрешности, обусловленные различным временем прохождения сигнала в каналах L1 и L2 передатчика и приемника соответственно;  $\delta$  – 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  $1 \text{ м}^2$ , 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  $5 \dots 10 \text{ см}$ .

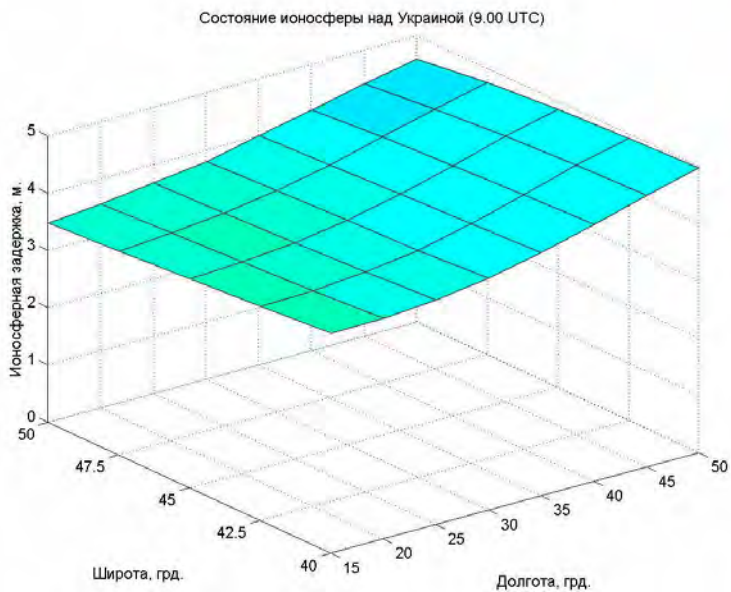
Ионосферные карты представляют собой значения интегральных электронных концентраций в вертикальном направлении от точек сетки с шагом  $5^\circ$  по долготе и  $2,5^\circ$  по широте. Иллюстрация фиксированной карты ионосферы в глобальном масштабе и в масштабе географического положения Украины на 3.08.2002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

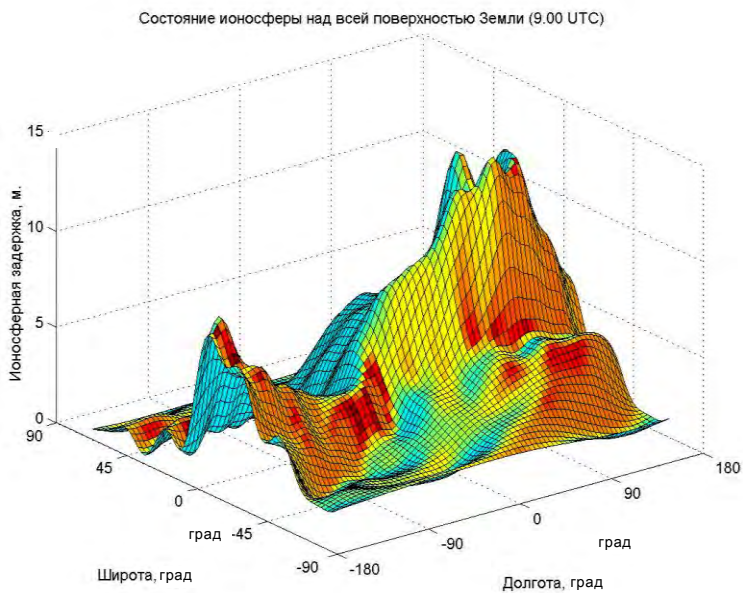
$$E(\beta, \lambda, t) = \frac{T_{i+1} - t}{T_{i+1}} E_i(\beta, \lambda) + \frac{t - T_i}{T_{i+1} - T_i} E_{i+1}(\beta, \lambda), \quad (2)$$

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

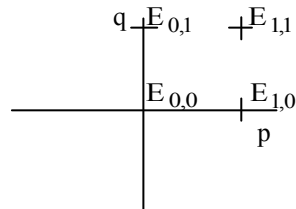


Рис. 2. Двумерная интерполяция

$$F_1 = \text{TEC}/\text{VTEC} = 1/\text{Cos}' \quad (4)$$

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

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  $10^\circ$ . 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-

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

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 $3\sigma$ , %
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
<b>Σ</b>	<b>-2,65</b>	<b>7,44</b>	<b>0,38</b>	<b>0,77</b>	<b>20465</b>	<b>1,45</b>

**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  $3\sigma$ , 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.