

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ GEMTEC

В.Б. Иванов, А.А. Холмогоров

COMPARATIVE TESTING OF TOTAL ELECTRON CONTENT MODEL GEMTEC

V.B. Ivanov, A.A. Kholmogorov

Статья посвящена сравнительному анализу моделей полного электронного содержания ионосферы. Сравнению подлежат три модели: Клобучара, GEMTEC и NTCM-GL. Дана краткая характеристика всех вышеперечисленных моделей. В статье сравнивается качество воспроизведения экспериментальных данных путем тестирования моделей по остаточной ошибке позиционирования на данных сети станций IGS. В результате показано, что модели GEMTEC и NTCM-GL показывают более высокую точность позиционирования, чем модель Клобучара. Наилучшие результаты коррекции ионосферной ошибки обеспечивает модель GEMTEC.

The article is devoted to the comparative analysis models the total electron content of the ionosphere. Three models: Klobuchar, GEMTEC and NTCM-GL are compared. As a result of the test shows that, the models GEMTEC and NTCM-GL show a higher positioning accuracy than the model Klobuchar. Model GEMTEC provides the best results ionosphere error correction.

Одной из главных причин возникновения ошибок позиционирования объектов с использованием глобальных навигационных спутниковых систем является дополнительное запаздывание радиосигналов при их распространении в ионосферной плазме. В одночастотной радионавигационной аппаратуре коррекция дополнительного ионосферного запаздывания производится с помощью моделей полного электронного содержания (ПЭС). Интерфейсным контрольным документом GPS рекомендовано использование модели ПЭС Клобучара [Klobuchar, 2006]. Как показала практика, и как это анонсировалось разработчиком этой модели, ее использование обеспечивает в среднем устранение 50–60 % ионосферной ошибки, что нельзя считать вполне удовлетворительным. В 2011 г. практически одновременно и независимо друг от друга были представлены две такого рода модели, которые могут претендовать на замену модели Клобучара. Речь идет о модели NTCM_GL [Jakowski, Hoque, Mayer, 2011] и модели GEMTEC [Ivanov, Gefan, Gorbachev, 2011].

Модель Клобучара создавалась около 30 лет назад и ориентирована на минимальные вычислительные ресурсы устройств того времени. Поэтому эта модель представляет собой максимально упрощенную схему, предназначенную для генерации текущего значения вертикального ПЭС для заданного положения потребителя.

Модель полного электронного содержания NTCM_GL является глобальным расширением европейской региональной модели NTCM. Она разработана на основе таблиц многолетних измерений вертикального ПЭС, представленных так называемой моделью GIM – глобальных карт эмпирических данных. Конкретно в качестве таковых использовались данные от европейского центра определения орбит CODE. Исходные данные при построении модели подвергались регрессионному анализу с целью оптимального представления зависимостей ПЭС от

входных параметров через тригонометрические и показательные функции [Jakowski, Hoque, Mayer, 2011].

Модель GEMTEC (Global Empirical Model of Total Electron Content) является разработкой авторов и, аналогично модели NTCM_GL, является глобальной эмпирической моделью. Более того, независимо от разработчиков NTCM_GL базой исходных данных и здесь выбрана таблица карт GIM от центра CODE. В отличие от NTCM_GL в данной модели использован метод разложения исходных данных по естественным ортогональным функциям – метод главных компонентов.

Наиболее естественным способом оценки качества моделей GEMTEC и NTCM_GL является проведение массовых расчетов ошибок позиционирования в сравнении с использованием модели Клобучара. Следует уточнить, что в нашем случае позиционирование выполняется с использованием кодовых псевдодальномерных данных в одночастотном режиме.

Для проведения тестирования были достаточно произвольно выбраны 8 станций сети IGS, расположенных в различных географических широтах. Использовались пары наблюдательных (observation) и навигационных (navigation) RINEX-файлов для 22-го дня каждого месяца с 2001 по 2011 г., включительно. Было произведено усреднение по всему указанному диапазону месяцев и годов. Результаты тестирования в виде средних полных ошибок для каждой из восьми станций представлены в таблице. Усредненные

Таблица
Результаты тестирования по данным сети станций IGS

| Станция | Без коррекции | Модель Клобучара | Модель NTCM_GL | Модель GEMTEC |
|---------|---------------|------------------|----------------|---------------|
| Chat | 3.67 | 0.87 | 0.90 | 0.49 |
| Kely | 3.17 | 1.32 | 1.17 | 0.52 |
| Nrc1 | 3.18 | 1.01 | 0.84 | 0.40 |
| Kour | 2.17 | 1.74 | 0.87 | 0.79 |
| Tidb | 3.22 | 1.42 | 1.05 | 0.87 |
| Usno | 3.51 | 1.16 | 0.82 | 0.62 |
| Invk | 3.18 | 1.32 | 0.60 | 0.24 |
| Syog | 3.00 | 0.99 | 1.10 | 0.61 |
| Среднее | 3.14 | 1.23 | 1.03 | 0.57 |

значения представлены для четырех вариантов решений: без использования коррекции ионосферного запаздывания, с коррекцией ионосферного запаздывания по модели Клобучара, с коррекцией по модели NTSM_GL и по модели GEMTEC. В последней строке представлены соответствующие значения, усредненные по всем станциям. Все ошибки приведены в метрах.

Численные оценки, безусловно, свидетельствуют о том, что модель GEMTEC обеспечивает более высокую точность позиционирования в качестве инструмента коррекции дополнительного ионосферного запаздывания по отношению как к модели Клобучара, так и к модели NTSM_GL.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ivanov V.B., Gefan G.D., Gorbachev O.A. Global Empirical Modeling of the Total Electron Content of the Ionosphere for Satellite Radio Navigation Systems // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011. V. 73. P. 1703–1707.

Jakowski N, Hoque M.M., Mayer C. A new global TEC model for estimating transionospheric radio wave propagation errors // *J. Geodesy.* 2011. V. 85, N 12. P. 965–974.

Klobuchar J.A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System.* 1986. V. 23, N 3. P. 325–331.

Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия