

УДК 621.396.98:629.195
DOI 10.17285/0869-7035.2018.26.3.110-120

А. П. АЛЁШКИН, Т. О. МЫСЛИВЦЕВ, С. В. НИКИФОРОВ, П. В. САВОЧКИН, И. В. САХНО,
А. А. СЕМЁНОВ, Б. В. ТРОИЦКИЙ

РАСЧЕТ НАВИГАЦИОННЫХ ПОПРАВОК ДЛЯ ОДНОЧАСТОТНОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ СРНС ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЗАТМЕНИЙ

Разработана методика формирования ионосферной точечной сетки SBAS на основе данных систем радиозатменного мониторинга ионосферы типа COSMIC. Данная методика позволяет рассчитывать значения вертикальной задержки сигнала спутниковых радионавигационных систем на частоте L1 для любой географической точки. Поправки используются одночастотным потребителем для повышения точности оценки своего местоположения при решении навигационной задачи. Совместное использование модели ионосферы и данных систем радиозатменного мониторинга позволяет в реальном времени формировать поправки в глобальном масштабе и выполнять их краткосрочный прогноз. Апробация предложенного метода показала хорошее согласование с данными станций вертикального зондирования и величинами вертикальных задержек сигнала на частоте L1, предоставляемых в виде дифференциальных поправок для потребителей системой EGNOS.

Ключевые слова: ионосферная точечная сетка, радиозатменный мониторинг, навигационные поправки, критическая частота, широкозонная дифференциальная система.

Введение

Использование спутниковых радионавигационных систем (СРНС) в интересах гражданских и специальных потребителей (сухопутных, морских, воздушных и космических) выдвигает новые и более высокие требования по точности местоопределения и навигации объектов.

Одним из направлений повышения точности координатно-временного обеспечения потребителей является использование дифференциального режима

Алёшкин Андрей Петрович. Доктор технических наук, профессор кафедры передающих, антенно-фидерных устройств и средств СЕВ, Военно-космическая академия (ВКА) им. А. Ф. Можайского (С.-Петербург).

Мысливцев Тимофей Олегович. Доктор технических наук, доцент, начальник кафедры передающих, антенно-фидерных устройств и средств СЕВ, ВКА им. А. Ф. Можайского.

Никифоров Сергей Валерьевич. Кандидат технических наук, преподаватель кафедры передающих, антенно-фидерных устройств и средств СЕВ, ВКА им. А. Ф. Можайского.

Савочкин Павел Владимирович. Кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры передающих, антенно-фидерных устройств и средств СЕВ, ВКА им. А. Ф. Можайского.

Сахно Игорь Викторович. Доктор технических наук, профессор, начальник института ВКА им. А. Ф. Можайского.

Семёнов Александр Александрович. Адъюнкт кафедры передающих, антенно-фидерных устройств и средств СЕВ, ВКА им. А. Ф. Можайского.

Троицкий Борис Владимирович. Доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник института ВКА им. А. Ф. Можайского.

СРНС. В основе дифференциального режима лежит учет значительной и относительно постоянной части погрешностей навигации во времени и в пространстве, таких как:

- ошибки синхронизации и эфемеридного обеспечения навигационных космических аппаратов (НКА);
- ошибки, вызванные влиянием атмосферной и ионосферной составляющих погрешностей измерений.

Реализация дифференциального режима осуществляется посредством создания соответствующих подсистем СРНС, примерами которых являются спутниковые системы дифференциальной коррекции (Satellite-Based Augmentation Systems – SBAS), в том числе WAAS (Wide Area Augmentation System, США), EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System, Европа), MSAS (Multi-Strike Avoidance System, Япония), GAGAN (GPS Aided Geo Augmented Navigation, Индия) и СДКМ (система дифференциальной коррекции и мониторинга, Россия) [1, 2, 3].

Для повышения точности определения местоположения одночастотного потребителя SBAS транслируют ионосферные поправки, компенсирующие задержки навигационного сигнала в ионизированной среде, которые, согласно стандарту SBAS, передаются в виде вертикальной задержки сигнала (в метрах). Данная величина определена в узлах ионосферной точечной сетки SBAS ($5^\circ \times 5^\circ$) и дает оценку вертикальной задержки сигнала на частоте L1 (1575,42 МГц) [1, 2].

Вместе с тем информация о величине вертикальных задержек в узлах ионосферной сетки доступна потребителю только в пределах зон действия SBAS (рис. 1) [1, 2].

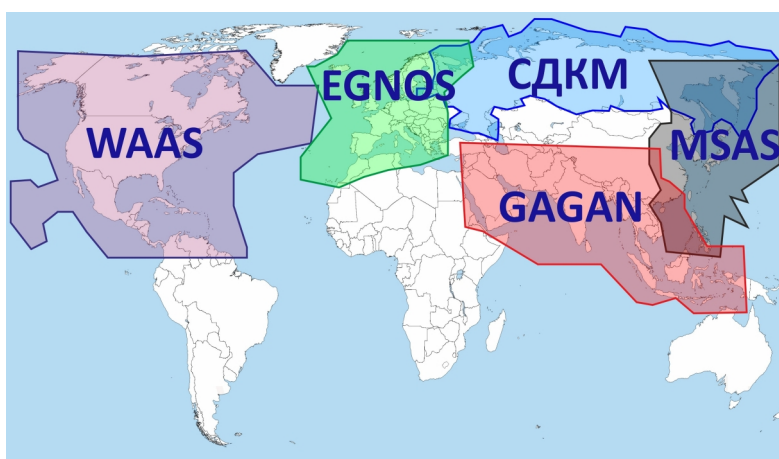


Рис. 1. Зоны действия подсистем SBAS

В этих условиях возникает актуальная задача оперативного формирования ионосферной точечной сетки SBAS на удаленных и труднодоступных территориях планеты, где отсутствуют разветвленные сети двухчастотных приемников.

В данной работе предлагается использовать результаты радиозатменного мониторинга ионосферы типа COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate) [4] для непрерывного формирования точечной сетки SBAS в режиме реального времени в любых регионах планеты.

Методика расчета навигационных поправок одночастотного потребителя СРНС по данным, полученным с использованием радиозатменной технологии

Технология спутниковых радиозатмений широко описана в научной литературе [4, 5, 6]. В проекте COSMIC используются передатчики СРНС GPS и приемники на низкоорбитальных ($h \approx 800$ км) космических аппаратах LEO (Low Earth Orbit). При затмении (уход LEO за лимб планеты) осуществляется зондирование атмосферы от высоты спутника до поверхности Земли.

В течение суток по проекту COSMIC производится около 2000-2500 зондирований атмосферы по всему земному шару, в том числе над океанами и труднодоступными районами суши. Данные измерений, в частности профилей электронной концентрации ионосферы, существенно дополняют результаты других методов мониторинга ионосферы, а в отдельных регионах, например над территорией мирового океана, могут стать определяющими при решении задач, требующих ионосферного обеспечения. Предполагаемое развитие программы COSMIC, заключающееся в увеличении числа LEO и привлечении других (кроме GPS) созвездий СРНС – ГЛОНАСС, Galileo и др., позволит заметно улучшить пространственно-временное разрешение структуры атмосферы и ионосферы, отследить динамику протекающих в них процессов и в итоге способствовать решению проблем солнечно-земной физики, космической погоды и повышения точности и эффективности систем связи, локации и навигации [7].

Для примера на рис. 2 на произвольно выбранную дату 27 февраля 2014 г. отмечены места зондирования атмосферы (круглые маркеры) для области с координатами 30°N , 80°N ; 20°W , 60°E (Европейский регион), где первые два значения – широта, вторые – долгота.

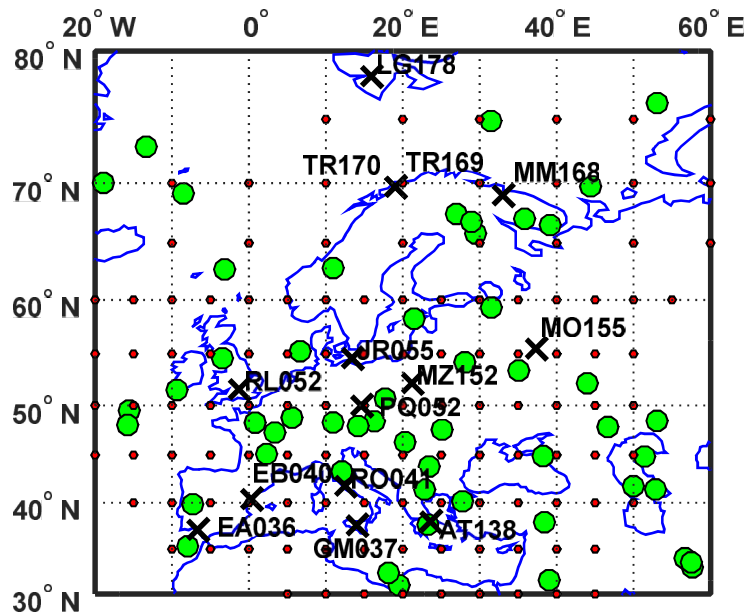


Рис. 2. Европейский регион с нанесенными узлами ионосферной точечной сетки системы EGNOS, точками радиозатмений (круглые маркеры) и местами расположений ионозондов (кресты) за 27 февраля 2014 г.

Точками указаны узлы ионосферной точечной сетки, для которых система EGNOS предоставляет данные, содержащие величины вертикальных задержек сигнала на частоте L1. Кроме того, показано расположение сети станций вертикального зондирования (ВЗ) данной области (кресты), так как их эталонные данные в дальнейшем будут использованы для верификации предложенной методики. Для оценки состояния ионосферы конкретного региона требуется его равномерное покрытие измерениями (в данном случае радиозатмениями).

Анализ радиозатменных данных показал, что для первоначального накопления требуется интервал 2-4 часа, который берется из соображений равномерного поступления затмений [7]. В условиях, когда число ЛЕО будет возрастать, интервал первоначального накопления данных будет уменьшаться.

Таким образом, методика расчета навигационных поправок одночастотного потребителя СРНС по данным радиозатменной технологии может быть описана следующей последовательностью действий.

1. Для каждого затмения по методике, описанной в работе [7], рассчитывается ионосферный индекс солнечной активности (ИИСА).

2. По совокупности всех рассчитанных значений ИИСА с использованием интерполяции можно сформировать локальные поля искомого индекса, позволяющие оценивать его значения в любой географической точке региона, охватываемого затмениями на конец заданного интервала накопления, для чего использована кубическая сплайн-интерполяция, которая позволяет обеспечить плавность изменения и неразрывность значений индекса.

3. На основе найденного ИИСА модель ионосферы позволяет рассчитать значение требуемого параметра ионизированной среды в конкретной точке на время фиксации последнего затмения.

Для расчета значения задержки (в метрах) в узлах ионосферной точечной сетки предлагается использовать модель ионосферы IRI-Plas [8] или любую другую модель, учитывающую плазмосферное содержание электронов и управляемую индексом солнечной активности. Искомую задержку получают из известного соотношения

$$I_i^{IRI-Plas}(\varphi, \lambda, t, W) = \frac{e^2}{8\pi^2 \varepsilon_0 m_e f_{L1}^2} \int_0^H N e^{IRI-Plas}(\varphi, \lambda, h, t, W) dh, \quad (1)$$

где φ, λ – географическая широта и долгота выбранного узла ионосферной точечной сетки, в которой получена задержка;

h – высота точки над поверхностью Земли, км;

$N e^{IRI-Plas}$ – концентрация электронов в точке (φ, λ, h) , рассчитанная по модели IRI-Plas, $1/\text{м}^3$;

e – заряд электрона, Кл;

m_e – масса электрона, кг;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость, Ф/м;

f_{L1} – частота, для которой передаются рассчитанные поправки в узлах ионосферной точечной сетки ($f_{L1} = 1,575 \cdot 10^9$ Гц);

t – время, на которое получена задержка, в УТ;

W – индекс солнечной активности (в нашем случае это ИИСА, определяемый методом, описанным в [7] по данным радиозатмений);

H – высота орбиты навигационного космического аппарата, км.

Для расчета полного электронного содержания (ПЭС) $\int_0^H Ne^{IRI-Plas}(\varphi, \lambda, h, t, W) dh$

применяется метод численного интегрирования. Шаг интегрирования по высоте для расчета значений вертикального ПЭС выбирается в диапазоне 1-10 км с целью сокращения вычислительных операций, а также в зависимости от размеров возможных крупномасштабных неоднородностей.

Соотношение (1) позволяет рассчитать вертикальную задержку сигнала на требуемое время для всех узлов ионосферной точечной сетки.

4. Пока следующие по времени затмения не зафиксированы и не обработаны, локальное поле ИИСА региона считается «замороженным».

При поступлении данных об очередных затмениях поле ИИСА должно рассчитываться с их учетом. При этом предыдущие затмения, расположенные вблизи от новых (в пределах радиуса пространственной корреляции ионосферы ≈ 1000 км или $\approx 5^\circ$), должны быть исключены при вычислениях [3].

На рис. 3 и 4 представлены карты локальных полей ИИСА (изолинии с цифровыми значениями) на 27 февраля 2014 г. на моменты времени 10:36 и 10:54 UT соответственно.

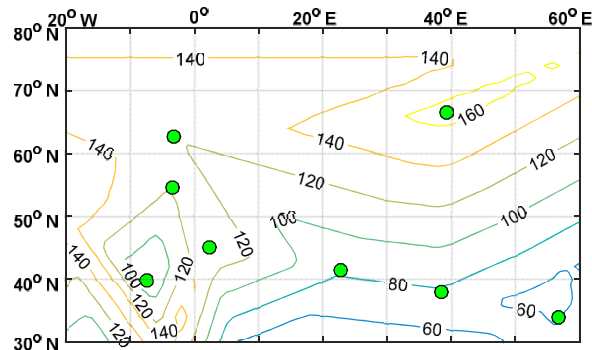


Рис. 3 Карта локальных полей ИИСА на момент времени 10:36 UT 27 февраля 2014 г.

На рис. 4 для затмения (незаштрихованный круглый маркер) с координатами $43,2^\circ N, 24,3^\circ E$ пунктирной линией показана область пространственной корреляции ионосферы радиусом 5° . Данное затмение появляется в момент времени 10:54 UT и в его 5° зону попадает затмение («звездочка»), которое было зафиксировано в 10:36 UT. Данные по более раннему затмению аннулируются, и в 10:54 UT формируются локальные поля ИИСА только по данным «действующих затмений» (заштрихованные и незаштрихованные круглые маркеры).

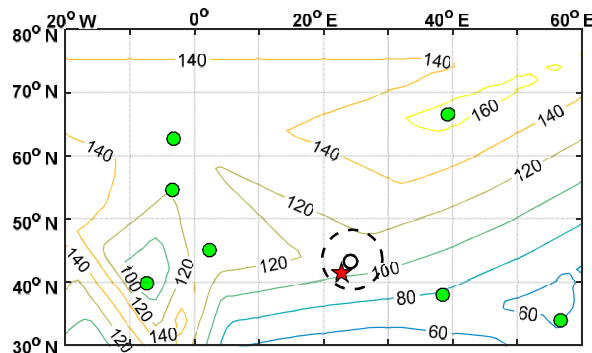


Рис. 4. Карта локальных полей ИИСА на момент времени 10:54 UT 27 февраля 2014 г.

При увеличении количества затмений локальные поля ИИСА будут формироваться чаще (изолинии будут «дышать»), а радиус корреляции можно будет уменьшить, что приведет к повышению достоверности описания состояния ионосферы в заданном районе.

Расчет локальных полей ИИСА по радиозатменным данным позволит с использованием модели IRI-Plas оценивать параметры ионосферы, а следовательно, рассчитывать критические частоты ионосферных слоев, ПЭС и формировать точечную сетку SBAS с требуемой дискретностью в пределах района наличия затмений в оперативном режиме с удовлетворительной точностью.

Сопоставление результатов расчетов по информации радиозатменного мониторинга с данными ионозондов и системы EGNOS

Оценка параметров ионосферы осуществлена на 27 февраля 2014 г. Затмения выбирались в регионе с координатами 30°N, 80°N; 20°W, 60°E. Данные размещены в *Taiwan Analysis Center for COSMIC* на сайте <http://tacc.cwb.gov.tw/en/> и в *COSMIC Data Analysis and Archive Center* на сайте <http://www.cosmic.ucar.edu/cdaac/>. В качестве истинных задержек сигнала на частоте L1 использовались поправки, предоставляемые системой EGNOS (<ftp://ems.estec.esa.int/pub/>).

Для оценки качества представленной методики предлагается косвенная проверка точности расчета ионосферной задержки путем сопоставления расчетных и измеренных значений критических частот f_oF_2 , которые определяются с помощью метода вертикального зондирования. Станции вертикального зондирования позволяют получить значения f_oF_2 с высокой точностью, вследствие чего эти значения можно считать эталонными. Критическая частота f_oF_2 позволяет определять максимум электронной концентрации, которая вносит наибольший вклад в оценку ПЭС и, соответственно, в определение вертикальной задержки.

Для верификации полученных результатов использовались значения критических частот f_oF_2 , содержащиеся в базах ионозондов (www.iono.noa.gr/DIAS), расположенных в том же регионе.

На рис. 5 показана динамика измеренных и рассчитанных значений критических частот f_oF_2 на 27 февраля 2014 г. в местах расположения двух ионозондов: RO041 с координатами 41,8°N; 12,5°E и GM037 с координатами 37,6°N; 14,0°E. Пунктиром (IRI Plas ssn=154) показаны результаты вычислений суточного хода f_oF_2 по модели IRI-Plas при прогнозном индексе солнечной активности (SSN) по данным National Geophysical Data Center, США (<http://spidr.ngdc.noaa.gov>), сплошной линией (VZ) – f_oF_2 , полученные по данным соответствующих ионозондов, а звездочками (IRI Plas Cos) – f_oF_2 , восстановленные с использованием предложенной методики.

Из рис. 5 видно, что погрешность определения f_oF_2 по предложенной методике не превышает в дневное и ночное время ~1,5-2 МГц, а средняя погрешность – 10%. В то же время значения суточного хода f_oF_2 по модели IRI-Plas при прогнозном SSN значительно превышают значения критических частот, которые получены от ионозондов.

Данный результат подтверждает возможность использования предложенной методики для оперативной оценки параметров ионосферы в обширном регионе, что допускает использование данного способа в качестве ионосферного обеспечения радиотехнических средств навигации, локации и связи.

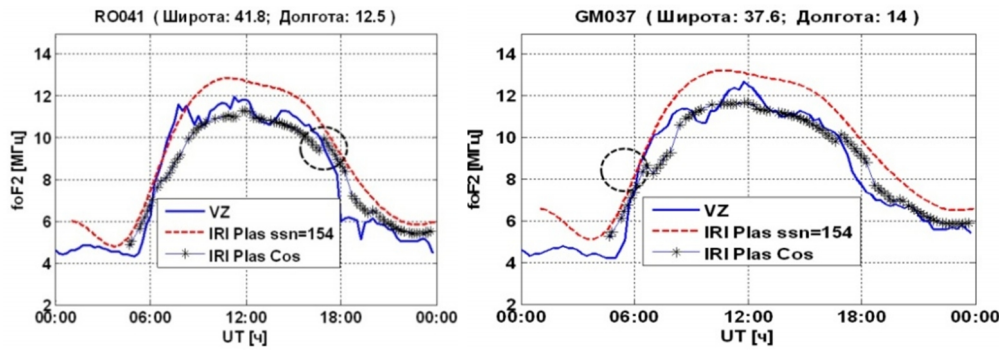


Рис. 5. Суточный ход значений $foF2$ по различным данным на 27 февраля 2014 г.

На рис. 5 значения $foF2$, восстановленные с использованием данной методики, отсутствуют на временном интервале с 00.00 до 04.00, что объясняется недостаточным «поступлением» затмений в области рассматриваемого региона. Скачки значений $foF2$ (IRI Plas Cos), обозначенных на том же рисунке «звездочками», обведенные пунктирными кружками, проявляются ввиду того, что затмения в точках с координатами представленных ионозондов отсутствуют долгое время, а при своем очередном «поступлении» заметно корректируют ход значений рассчитанных критических частот. При увеличении количества затмений в рассматриваемом регионе от подобных расхождений можно будет избавиться.

Рис. 6 демонстрирует суточные вариации величин вертикальных задержек сигнала на частоте L1 на 27 февраля 2014 г. для произвольно взятых узлов ионосферной точечной сетки данного региона с координатами 30°N; 20°E и 40°N; 20°E.

Пунктиром (IRI Plas ssn=154) показаны результаты вычислений суточного хода вертикальных задержек по модели IRI-Plas при прогножном SSN, сплошной линией (EGNOS) – величины вертикальных задержек, содержащиеся в дифференциальных поправках системы EGNOS, а «звездочками» (IRI Plas Cos) – данные, восстановленные с использованием предложенной методики.

Отсутствие на временном интервале с 00.00 до 04.00 расчетных значений величины вертикальных задержек в варианте IRI Plas Cos, обозначенных на рис. 6 «звездочками», а также их скачки, обведенные пунктирными кружками, как и в предыдущем случае, вызваны появлением нового затмения вблизи узла точечной сетки.

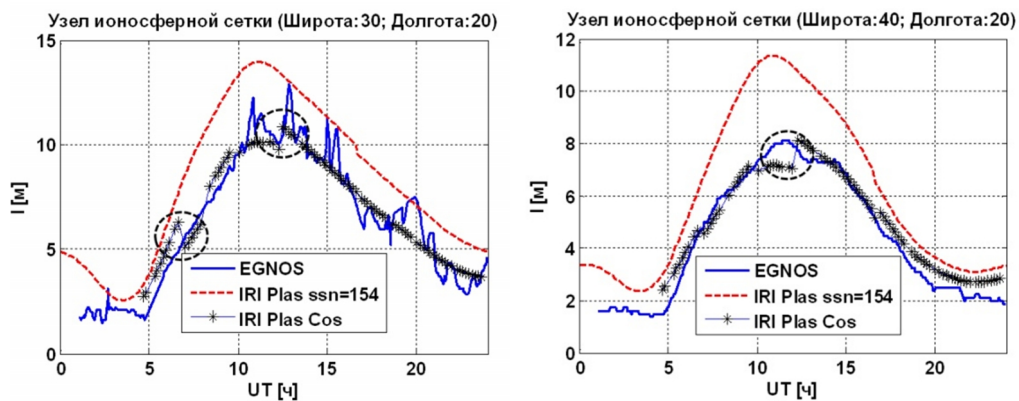


Рис. 6. Суточные вариации значений вертикальной задержки сигнала на частоте L1 по различным данным на 27 февраля 2014 г.

В табл. 1 представлены абсолютные значения математического ожидания (ΔI) и среднеквадратического отклонения разности значений вертикальной задержки сигнала на частоте L1 по данным, восстановленным с использованием предложенной методики (I^{RO}) и содержащимся в дифференциальных поправках системы EGNOS (I^{EGNOS}). Расчет производился с использованием выражений:

$$\Delta I = |I^{RO} - I^{EGNOS}|; \sigma = \frac{|I^{RO} - I^{EGNOS}|}{I^{EGNOS}} \cdot 100\%.$$

Т а б л и ц а 1

Статистические характеристики погрешностей определения вертикальной ионосферной задержки

Узел ионосферной сетки	Математическое ожидание (ΔI)		СКО (σ)	
	абсолютное, м	относительное, %	абсолютное, м	относительное, %
Широта 30; Долгота 20	0,74	12,13	0,52	9,55
Широта 40; Долгота 20	0,45	11,29	0,25	8,70

Вывод: поправки в зоне EGNOS с достаточной точностью могут быть определены по данным радиозатмений без наземной сети двухчастотных приемников навигационной аппаратуры потребителя.

В качестве примера была сформирована сетка ионосферных задержек SBAS на 27 февраля 2014 г. для произвольно выбранного региона (Южная Африка с координатами 50°S, 0°; 10°W, 60°E), который не охватывается ни одной из существующих SBAS. На рис. 7 показано расположение ионозондов (обозначены крестами), отмечены места затмений (заштрихованные круглые маркеры) и узлы ионосферной точечной сетки, для которых необходимо непрерывно рассчитывать величины вертикальных задержек сигнала на частоте L1 для формирования сетки ионосферных задержек SBAS.

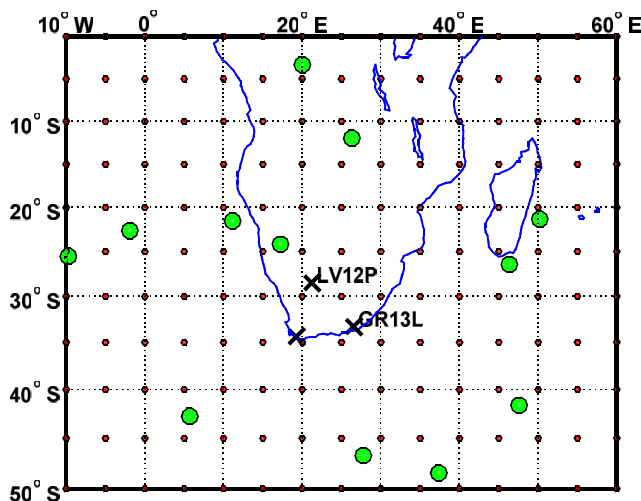


Рис. 7. Южноафриканский регион с нанесенными узлами ионосферной точечной сетки, точками радиозатмений за 27 февраля 2014 г. и местами расположений ионозондов

Используя методику формирования ионосферной сетки SBAS, оценим значения вертикальной задержки сигнала на частоте L1 для узла с координатами 30°S; 20°E. На рис. 8 представлен суточный ход вертикальной задержки сигнала на частоте L1 по различным данным, где пунктиром (IRI Plas ssn=154) показаны результаты вычислений суточного хода вертикальных задержек по модели IRI-Plas при прогнозном SSN, «звездочками» (IRI Plas Cos) – данные, восстановленные с использованием предложенной методики.

Для оценки адекватности рассчитанных значений вертикальной задержки сигнала на частоте L1 по предложенной методике сравним данные суточного хода $foF2$ ионозонда LV12P и результаты радиозатменного мониторинга.

На рис. 9 представлен результат сравнения величин критических частот $foF2$ на 27 февраля 2014 г. для ионозонда LV12P с координатами 28.5°S; 21.2°E. Пунктиром (IRI Plas ssn=154) показаны результаты вычислений суточного хода $foF2$ по модели IRI-Plas при прогнозном SSN, сплошной линией (VZ) – $foF2$, полученные по данным ионозонда, а «звездочками» (IRI Plas Cos) – $foF2$, восстановленные с использованием предложенной методики.

Из рис. 9 очевидно, что вариации критических частот, полученных с помощью ионозонда и рассчитанных по данным радиозатмений, хорошо коррелируют, как и при сопоставлении результатов в европейском регионе. Это дает основание утверждать, что расчетные вариации вертикальных задержек для узлов точечной сетки данного региона будут отличаться от истинных значений не более чем на 8-10% (как и в зоне EGNOS).

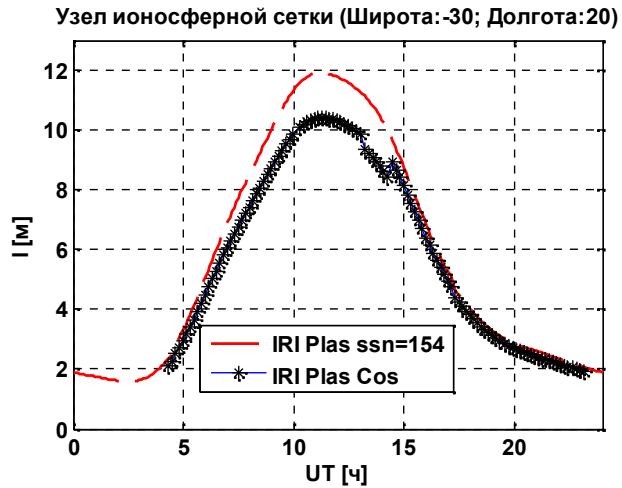


Рис. 8. Суточные распределения значений вертикальной задержки сигнала на частоте L1 по различным данным на 27 февраля 2014 г.

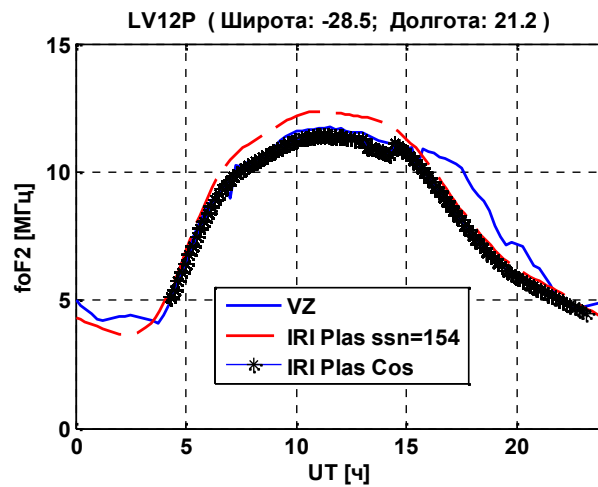


Рис. 9. Суточные распределения значений $foF2$ по различным данным на 27 февраля 2014 г.

Заключение

Предложена методика формирования ионосферной сетки SBAS обширных регионов на основе данных, полученных при использовании технологии радиозатмений. Методика основана на применении ионосферной модели (например,

IRI-Plas или любой другой, которая учитывает плазмосферное содержание) с корректируемым ИИСА, полученным в результате формирования локальных полей искомого индекса с учетом постоянно обновляемой информации о состоянии ионосферы на основе радиозатмений.

По совокупности результатов обработки данных радиозатмений сделан вывод, что предложенная методика позволяет формировать ионосферную сетку SBAS в оперативном режиме, по точности не уступающую информации, предоставляемой в дифференциальных поправках SBAS (на примере системы EGNOS).

При расширении используемых группировок СРНС и увеличении числа LEO при условии доступности данных в реальном времени методика формирования ионосферной сетки SBAS может быть рекомендована для применения одностатными потребителями для повышения точности местоопределения и навигации вне районов действия SBAS, включая Мировой океан.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Current and planned** global and regional navigation satellite systems and satellite-based augmentation systems of the International Committee on Global Navigation Satellite Systems Providers Forum. 59 p. New York: United Nations, 2010.
2. **Радиосигналы** и состав цифровой информации функционального дополнения системы ГЛОНАСС системы дифференциальной коррекции и мониторинга: интерфейсный контрольный документ. Редакция 1. М.: ОАО «Российские космические системы», 2012. 132 с.
3. **Соловьев Ю.А.** Системы спутниковой навигации / Ю.А. Соловьев. М.: Эко-Трендз, 2000. 267 с.
4. **Hajj, G.A., et al.** COSMIC GPS Ionospheric Sensing and Space Weather, *TAO*, March 2000, vol. 11, no. 1, pp. 235–272.
5. **Krankowski, A., Zakharenkova, I., Krypiak-Gregorczyk, A.,** Ionospheric Electron Density Observed by FORMOSAT-3/ COSMIC over the European Region and Validated by Ionosonde Data, *Journal of Geodesy*, 2011, no. 85, issue 12, pp. 949–964.
6. **Яковлев О.И., Павельев А.Г., Матюгов С.С.** Спутниковый мониторинг Земли: Радиозатменный мониторинг атмосферы и ионосферы. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 208 с.
7. **Мысливцев Т.О., Никифоров С.В., Погорельцев А.И., Савочкин П.В., Сахно И.В., Семенов А.А., Троицкий Б.В.** Расширение возможностей широкозонных дифференциальных систем спутниковой навигации при использовании технологии радиозатмений // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2016. Т. 56. № 4. С. 489–495.
8. **Gulyaeva, T.L., Huang, X, and Reinich, B.W.,** The ionosphere-plasmasphere model software for ISO, *Act Geod. Geophys. Hu*, 2002, vol. 37, no.3, pp. 143–152.

Aleshkin, A.P., Myslitsev, T.O., Nikiforov, S.V., Savochkin, P.V., Sakhno, I.V., Semenov, A.A., Troitskii, B.V. (Mozhaiskiy Military Space Academy, St. Petersburg, Russia)
Calculation of Navigation Corrections for a Single-Frequency Consumer of Satellite Radionavigation System (SRNS) Based on Satellite Radio occultation data, *Гироскопия и Навигация*, 2018, vol. 26, no. 3 (103), pp. 110–120.

Abstract. A methodology has been developed to form SBAS ionospheric grid points, based on the data from ionosphere radio occultation monitoring systems such as COSMIC. This methodology facilitates calculation of vertical delay of SRNS signals on frequency L1 for any geographical location. The corrections are used by a single-frequency consumer for improving the accuracy of its position estimation in solving the navigation problem. Using the combination of ionosphere model and the data from radio occultation monitoring systems, it is possible to form real-time corrections in global scale, and to make their short-term forecasts. The proposed method

testing results showed good conformance with the data from vertical probing stations, and the magnitudes of vertical delays of signal on frequency L1, represented by EGNOS system as differential corrections for consumers.

Key words: ionospheric grid points, radio occultation monitoring, navigational corrections, critical frequency, wide-area differential system.

References

1. **Current and Planned Global** and Regional Navigation Satellite Systems and Satellite-based Augmentation Systems, *International Committee on Global Navigation Satellite Systems Providers' Forum*, New York: United Nations, 2010.
2. *Radiosignaly i sostav tsifrovoy informatsii funktsional'nogo dopolneniya sistemy GLONASS, Sistemy differentsial'noi korrektsii i monitoringa* (Radio Signals and Content of Digital Information for Functional Complementation of GLONASS System, Differential Correction and Monitoring Systems), Interface Control Document, Rev. 1, Moscow: OAO Rossiiskie kosmicheskie sistemy, 2012.
3. **Solov'ev, Yu.**, *Sistemy sputnikovoi navigatsii* (Satellite Navigation Systems), Moscow: Eco-Trends, 2000.
4. **Hajj, G.A., et al.**, COSMIC GPS ionospheric sensing and space weather, *TAO*, March 2000, vol. 11, no. 1, pp. 235–272.
5. **Krankowski, A., Zakharenkova, I. and Krypiak-Gregorczyk, A.**, Ionospheric electron density observed by FORMOSAT-3/COSMIC over the European region and validated by ionosonde data, *Journal of Geodesy*, 2011, vol. 85, no. 12, pp. 949–964.
6. **Yakovlev, O.I., Pavel'ev, A.G. and Matyugov, S.S.** *Sputnikovyi monitoring Zemli: Radiozatsmennyy monitoring atmosfery i ionosfery* (Satellite Monitoring of the Earth: Radio Occultation Monitoring of Atmosphere and Ionosphere), Moscow: LIBROKOM Publishing House, 2010.
7. **Myсливцев, Т.О., Никифоров, С.В., Погорел'тсев, А.И., Савочкин, П.В., Сахно, И.В., Семенов, А.А. and Троицкий, В.В.**, Improving capabilities of broadband differential satellite navigation systems via radio occultation technology, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2016, vol. 56, no. 4, pp. 489–495.
8. **Gulyaeva, T.L., Huang, X. and Reinich, B.W.**, The ionosphere-plasmasphere model software for ISO, *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 2002, vol. 37, no.3, pp. 143–152.

Материал поступил 29.11.2017