

О. А. ГОРБАЧЕВ, В. Т. ЗАЛУЦКИЙ, В. Б. ИВАНОВ, Д. В. ХАЗАНОВ, А. А. ХОЛМОГОРОВ

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МОДЕЛИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ GEMTEC ПРИ АВТОНОМНОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ В ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ

Рассматривается возможность повышения точности позиционирования в одночастотной аппаратуре ГНСС за счет использования новой модели полного электронного содержания GEMTEC. Представлены результаты тестирования данной модели по сравнению со стандартной методикой, использующей модель Клобучара.

Ключевые слова: GPS, ГЛОНАСС, ионосфера, модель, коррекция, позиционирование, полное электронное содержание.

Введение

Авторами разработана модель полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы GEMTEC (Global Empirical Modeling of the Total Electron Content), ориентированная на внедрение в методику коррекции дополнительного ионосферного запаздывания сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Модель предлагается как альтернатива используемой в настоящее время в одночастотной навигационной аппаратуре модели Клобучара [1], рекомендованной Интерфейсным контрольным документом GPS. Целесообразность разработки новой модели ПЭС обусловлена тем, что, во-первых, опыт ионосферного моделирования позволяет рассчитывать на создание более точной по сравнению с моделью Клобучара методики и, во-вторых, прогресс в наращивании вычислительных ресурсов навигационных приемников, обеспечивает возможности внедрения более ресурсоемкого программного обеспечения.

Концепция нашего подхода к моделированию ПЭС основана на применении метода разложения эмпирических данных по естественным ортогональным функциям (метод главных компонент). Первая попытка реализации такого подхода представлена в работе [2]. Подробное описание современного варианта модели GEMTEC, а также предварительные оценки качества модели представлены в статье [3]. В процессе разработки модель подвергалась модификации и оптимизации. Параллельно проводилось тестирование вариантов модели

Горбачев Олег Анатольевич. Доктор технических наук, профессор Московского государственного технического университета гражданской авиации.

Залуцкий Вячеслав Трофимович. Кандидат технических наук, главный геодезист проектно-изыскательного института «Иркутскжелдорпроект».

Иванов Всеволод Борисович. Доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики Иркутского государственного университета.

Хазанов Дмитрий Владимирович. Кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой, доцент Иркутского филиала Московского государственного технического университета гражданской авиации.

Холмогоров Андрей Александрович. Аспирант Иркутского государственного университета.

GEMTEC с точки зрения повышения точности позиционирования по сравнению с моделью Клобучара. Предварительные результаты такого тестирования, подтверждающие преимущества модели GEMTEC, представлены в работе [4]. В настоящее время работа над моделью GEMTEC в основном завершена. Модель GEMTEC представляет собой компьютерную программу размером ~50 кбайт, состоящую из блока числовых данных и процедуры их обработки и определяющую величину ионосферной погрешности для заданных входных параметров: координат, времени и индекса солнечной активности $F_{10.7}$ – потока радиоизлучения солнца на длине волны 10,7 см.

В данной публикации представлены результаты оценки качества модели GEMTEC применительно к решению задачи автономных определений местоположения по сигналам ГНСС. В частности, приводятся результаты сравнительного анализа информации о ПЭС, полученной с помощью моделей GEMTEC и Клобучара. Также проведено их сравнение с апостериорными оценками ПЭС в виде карт GIM (Global Ionospheric Maps), полученными международной службой IGS по наблюдениям за спутниками GPS. Основной частью представляемых ниже материалов являются экспериментальные данные, показывающие степень влияния модели GEMTEC на точность автономных определений пространственного положения приемной антенны сигналов ГНСС.

Самотестирование модели GEMTEC

Самотестирование модели GEMTEC заключалось в оценке качества воспроизведения моделью исходных данных, по которым путем сжатия и фильтрации на основе метода естественных ортогональных функций построена модель. В финальном варианте модели GEMTEC такими данными являются карты GIM, представленные европейским центром CODE (Center for Orbit Determination in Europe). Выбор среди доступных с 2001 года карт от ряда центров произведен на основе сравнительного анализа погрешности позиционирования.

На рис. 1 представлены результаты моделирования полного электронного содержания по моделям GEMTEC и Клобучара. Показан типичный временной ход вариаций вертикального ПЭС $I(t)$ в фиксированной среднеширотной точке с широтой 52.5° N на нулевом меридиане. За период с 2003 по 2012 г. в каждом году выбиралось 36 дней (5, 15, и 25 числа каждого месяца) для дневных и ночных значений. Для визуального отображения результатов в каждом месяце производилось усреднение по соответствующим трем суткам так, что графики построены по 120 точкам.

На рис. 1, *а* представлены дневные значения (14 ч UTC), на рис. 1, *б* – ночные (02 ч UTC) значения. Изображен интервал времени t (горизонтальная ось), охватывающий десятилетний период с 2003 по 2012 г. включительно. По вертикальной оси отложены значения вертикального ПЭС $I(t)$ в единицах TECU (Total Electronic Content Units – определяется как 10^{16} электронов/м²). Измеренные экспериментальные значения ПЭС из карт GIM для данных центра CODE показаны черным цветом. Синяя линия изображает вариации ПЭС, представляемые моделью GEMTEC. Красная линия соответствует расчетам по модели Клобучара.

Из визуального анализа кривых на рисунке можно сделать вывод, что модель GEMTEC безусловно лучше воспроизводит экспериментальные данные по сравнению с моделью Клобучара.

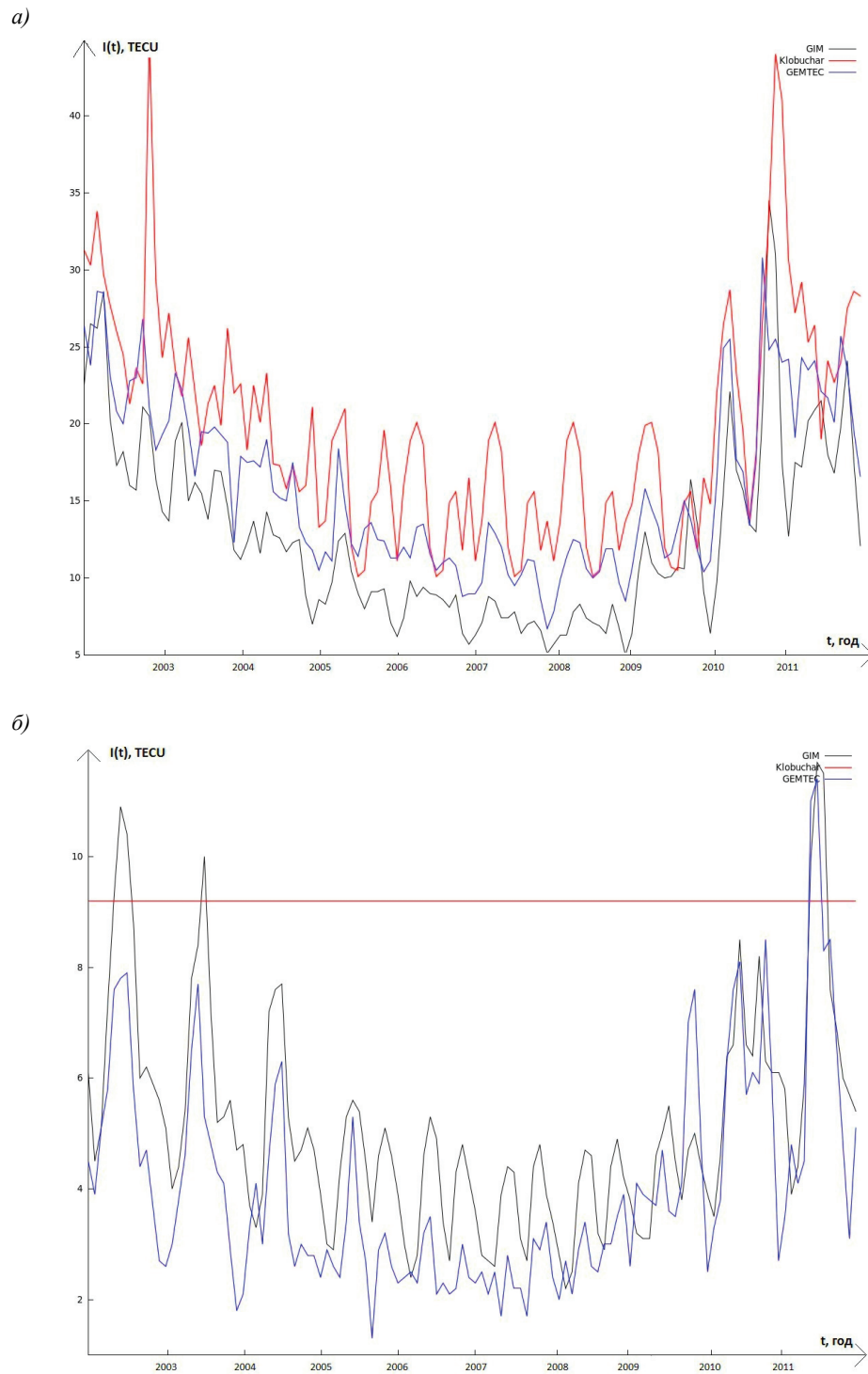


Рис. 1. Временные вариации ПЭС в течение 10 лет, рассчитанные по модели Клобучара (красная линия), по модели GEMTEC (синяя линия) и исходные данные по картам GIM (черная линия): а) дневные значения, б) ночные значения

Для количественного описания статистической связи между рассматриваемыми величинами использован коэффициент парных корреляций Пирсона

$$R_{xy} = \frac{\langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1)$$

Здесь в качестве x фигурирует последовательность значений ПЭС, вычисленных по модели GEMTEC или Клобучара; y – последовательность ПЭС по картам GIM. Также для количественного сравнения эффективности моделей рассчитывалась среднеквадратичная погрешность

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (2)$$

Результаты расчетов по всем 360 точкам приведены в табл. 1. Среднеквадратичная погрешность представлена в единицах TECU. Для ночных условий, поскольку ПЭС является константой, коэффициент R не рассчитывался.

Т а б л и ц а 1

	$R_{\text{день}}$	$R_{\text{ночь}}$	$\sigma_{\text{день}}$	$\sigma_{\text{ночь}}$
Клобучар	0,69	-	9,2	5,6
GEMTEC	0,83	0,73	4,8	2,0

Представленные результаты расчетов убедительно свидетельствуют о преимуществе модели GEMTEC по сравнению с моделью Клобучара в части воспроизведения моделями экспериментальных данных.

Тестирование по данным станций сети IGS

Наиболее естественным способом оценки качества модели GEMTEC является проведение массовых расчетов погрешности позиционирования и их сравнение с расчетами при использовании модели Клобучара. Такое тестирование было выполнено с помощью инструментария GPS Toolkit [5, 6]. В состав этого пакета входит программа RINEXPVT, разработанная для решения навигационной задачи в режиме постобработки реальных данных, представленных наблюдательными и навигационными *gimex*-файлами. Эти данные для станций слежения за навигационными спутниками, входящих в сеть IGS, могут быть получены, в частности, с сервера <http://sopac.ucsd.edu/cgi-bin/dbDataBySite.cgi>. Программа RINEXPVT, таким образом, эмулирует процесс определения координат (а также скорости и времени) потребителя, происходящий в реальном времени в навигационных приемниках. Следует уточнить, что в нашем случае позиционирование выполняется с использованием кодовых псевдодальномерных данных в одностороннем режиме.

Программа RINEXPVT, как и весь инструментарий GPS Toolkit, написана на языке программирования C++ и представлена открытым кодом, т. е. допускает модификацию пользователем. Ввиду такой возможности был разработан вариант программы, в котором взамен стандартного алгоритма коррекции ионосферной погрешности по модели Клобучара применена последняя версия модели GEMTEC. Кроме того, программа RINEXPVT может работать в режиме отключенной ионосферной коррекции.

Для проведения тестирования были произвольно выбраны 8 станций сети IGS, расположенных в средних, низких и высоких географических широтах. Использовались пары наблюдательных (observation) и навигационных (navigation) rinex-файлов для 22-го дня каждого месяца с 2001 по 2011 год включительно. Файлы наблюдений содержат данные с временным шагом в 30 с на протяжении всех суток. С такой же периодичностью вычислялись координаты приемника. Результирующим значением вычисления служили усредненные за сутки координаты. Затем производилось усреднение по всему указанному диапазону времени.

В табл. 2 для каждой из восьми станций представлены их географические координаты и усредненные значения евклидовых расстояний между координатами, полученными при решении навигационной задачи, и истинными координатами фазовых центров антенн. Усредненные значения представлены для трех вариантов решений: 1) без использования коррекции ионосферного запаздывания, 2) с коррекцией ионосферного запаздывания по модели Клобучара, 3) с коррекцией по модели GEMTEC. В последней строке представлены соответствующие значения, усредненные по всем станциям. Все погрешности приведены в метрах.

Таблица 2

Название станции	Координаты станции	Средняя погрешность определения координат, м		
		без коррекции	по модели Клобучара	по модели GEMTEC
Chat	43,6 ⁰ S, 176,2 ⁰ E	3,67	0,87	0,49
Kely	66,6 ⁰ N, 50,6 ⁰ W	3,17	1,32	0,52
Nrc1	45,2 ⁰ N, 75,4 ⁰ W	3,18	1,01	0,40
Kour	5,3 ⁰ N, 52,8 ⁰ W	2,17	1,74	0,79
Tidb	35,2 ⁰ S, 148,6 ⁰ E	3,22	1,42	0,87
Usno	39,8 ⁰ N, 77,0 ⁰ W	3,51	1,16	0,62
Invk	68,3 ⁰ N, 133,5 ⁰ W	3,18	1,32	0,24
Syog	69,0 ⁰ S, 39,6 ⁰ E	3,00	0,99	0,61
Среднее		3,14	1,23	0,57

Как следует из таблицы, использование модели GEMTEC существенно уменьшает погрешность позиционирования. Модель Клобучара устраняет чуть более 60% абсолютной погрешности, модель GEMTEC – более 80%. Иными словами, модель GEMTEC примерно вдвое уменьшает остаточную погрешность по сравнению с моделью Клобучара.

Тестирование на навигационных приемниках МНП М7

В Иркутском филиале Московского государственного технического университета гражданской авиации (МГТУГА) создан регистрационный стенд GPS/ГЛОНАСС, предназначенный для проведения исследовательских работ, связанных со спутниковыми радионавигационными системами. Стенд состоит из приемной антенны GPS/ГЛОНАСС с рабочим диапазоном частот L1, фидерного оснащения, включающего сплиттер, обеспечивающий параллельное подключение к антенне двух навигационных приемников, персональных компьютеров для управления и обработки информации, источника бесперебойного питания. В качестве навигационных приемников использовались модифицированные одночастотные устройства МНП-М7 производства ОАО «Ижевский радио-завод». Модификация выполнена разработчиками приемника и заключалась во внедрении в программное обеспечение приемника методики коррекции ионосферной задержки с использованием модели GEMTEC. Стандартно используемая в приемнике МНП-М7 методика коррекции ионосферного запаздывания по модели Клобучара изменениям не подвергалась. Таким образом, в данном приемнике имеется возможность выполнения позиционирования по обоим методикам. Регистрационный стенд позволяет протоколировать результаты решения навигационной задачи в формате текстового файла протокола NMEA с темпом 1 измерение в секунду.

При решении навигационной задачи могут быть задействованы системы GPS и ГЛОНАСС как по отдельности, так и в совместном использовании. Представленные ниже данные получены для варианта совместного использования обеих систем. При параллельных измерениях один из приемников работал в стандартном режиме – с использованием коррекции ионосферной погрешности по модели Клобучара, второй – с применением модели GEMTEC. Для последнего варианта в командной строке управляющей приемником программы вводилось текущее значение индекса солнечной активности $F_{10.7}$.

Поскольку целью тестирования явилось исследование погрешности позиционирования, предварительно было выполнено определение точных координат фазового центра приемной антенны регистрационного стенда. Эта процедура, условно называемая «абсолютизацией координат», была выполнена относительным методом геодезической привязки к пунктам с точно известными (исходными) координатами. В качестве исходных использовались два пункта из состава сети IGS. Точность определения пространственного положения фазового центра антенны стенда достигалась на уровне средней квадратичной погрешности, не превышающей $\pm 0,4 - \pm 0,6$ м при 95%-ном уровне доверительной вероятности.

Процедура абсолютизации положения фазового центра базировалась на совместной обработке результатов кодово-фазовых измерений навигационными приемниками МНП-М7, установленными на регистрационном стенде, и результатов измерений двухчастотными приемниками геодезического класса, установленными на исходных пунктах из состава отечественной фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) и международной службы IGS в Иркутске (астрогеодинамическая обсерватория Восточно-Сибирского НИИФТРИ). В частности, использовались данные от пунктов IRKT (GPS-приемник TR-8000) и IRKJ (GPS/ГЛОНАСС-приемник Legacy-E GGD).

Результаты «сырых» измерений навигационных приемников были представлены в формате RINEX и подвергнуты математической обработке совместно с кодово-фазовыми измерениями от геодезических приемников на станции ФАГС/IGS в Иркутске. Результаты измерений приемниками сети IGS были взяты из открытого ресурса <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/data/daily/2014/>.

Совместная обработка результатов кодово-фазовых измерений навигационными и геодезическими приемниками выполнялась с помощью программного комплекса Trimble Business Center v2.95. В процессе обработки синхронных фазовых измерений была сформирована геодезическая сеть, образованная векторами между исходными (IRKT, IRKJ) и определяемыми пунктами. Благодаря устранению многозначности фазовых измерений в векторах сети ее качество оказалось достаточно высоким и охарактеризовалось погрешностью единицы веса 16 мм. Этот факт позволил выполнить уравнивание сети с фиксацией в качестве исходных координат пунктов IRKT и IRKJ и вычислить прямоугольные геоцентрические координаты регистрационного пункта с круговой погрешностью пространственного положения ± 98 мм. Эти результаты примерно в 6-8 раз меньше установленного требования абсолютизации.

Абсолютные координаты пунктов IGS в системе ITRF2008, необходимые для уравнивания результатов привязки, были взяты с ресурса <http://itrf.ign.fr/ITRF-solutions/2008/>. Помимо прямоугольных геоцентрических координат вычислены геодезические координаты над эллипсоидом WGS-84, а также дополнительные данные, позволяющие оценивать качество решения навигационной задачи в Государственной системе координат РФ.

После определения координат фазового центра антенны приемника регистрационного пункта в весенне-летний период 2014 г. проведено 50 сеансов измерений длительностью около 24 ч каждый. Таким образом, измерения равномерно охватывают полный суточный ход и соответствующие средние регулярные суточные вариации состояний ионосферы. В указанный период индекс солнечной активности менялся от 95 до 170 единиц, т. е. был охвачен диапазон от умеренно низких до умеренно высоких значений солнечной активности.

По 50 сеансам измерений проведена статистическая обработка данных (табл. 3). Были рассчитаны средние (со знаком) отклонения определяемых приемниками высоты, широты и долготы от истинных значений, средние значения отклонений в горизонтальной плоскости и средние значения полной (3D) погрешности позиционирования. Кроме того, определялись доверительные границы указанных отклонений с вероятностью 0,95.

Таблица 3

Измеряемый параметр		Значения измеряемого параметра, м	
		по модели Клобучара	по модели GEMTEC
Среднее значение погрешности	Высота	1,19	0,23
	Широта	0,65	-0,04
	Долгота	0,90	0,92
	Горизонтальная	1,15	0,95
	Полная	1,72	1,20

Продолжение таблицы

Доверительный интервал, $P=0,95$	Высота	6,8	5,7
	Широта	3,3	3,0
	Долгота	3,2	2,6
	Горизонтальная	4,0	3,8
	Полная	7,6	6,2

Представленные в таблице данные свидетельствуют о существенном улучшении точности позиционирования при замене модели Клубучара на модель GEMTEC. Погрешность высоты при этом уменьшается в 5 раз, погрешность в определении широты уменьшается более чем на порядок.

Особого внимания требует рассмотрение ситуации с погрешностью по долготе. Как видно из табл. 3, применение обеих моделей дает примерно одинаковый результат, а само значение погрешности весьма велико – около 1 м. Поскольку применение обеих моделей дает примерно одинаковое значение погрешности, очевидно, что эта погрешность не связана с влиянием ионосферного запаздывания. Изучение природы долготной погрешности требует дальнейших исследований. Наличие значительной погрешности в определении долготы оказывает влияние на среднюю горизонтальную погрешность и среднюю полную (3D) погрешность. Тем не менее и здесь имеет место значительное улучшение точности.

Следует отметить и заметное уменьшение величины доверительного интервала по уровню вероятности 0,95, включая и данные по долготе. Разумеется, модель GEMTEC, как и модель Клубучара, не может корректировать случайные флуктуации ПЭС, в значительной степени влияющие на величину доверительного интервала. Уменьшение последнего при использовании модели GEMTEC свидетельствует о том, что эта модель лучше воспроизводит регулярный суточный ход полного электронного содержания.

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы.

1. Создана глобальная модель полного электронного содержания GEMTEC, которая может использоваться при коррекции дополнительного запаздывания распространения сигналов ГНСС в ионосфере как альтернатива модели Клубучара.

2. Модель GEMTEC может быть реализована в вычислительных системах одностотной навигационной аппаратуры потребителя, в том числе в навигационных приемниках потребительского класса.

3. Модель существенно лучше воспроизводит экспериментально определяемые значения полного электронного содержания в широком диапазоне геофизических условий по сравнению с моделью Клубучара.

4. Тестирование модели GEMTEC по реальным данным показало значительное повышение точности позиционирования одностотной аппаратуры потребителя по сравнению со стандартной методикой на основе модели Клубучара.

5. Модель свободна от необходимости получения и использования управляющих моделью Клобучара параметров, передаваемых в навигационном сообщении GPS.

Представленные результаты позволяют использовать модель GEMTEC в качестве альтернативы модели Клобучара в системе коррекции дополнительного ионосферного запаздывания для одночастотных навигационных приемников. Замена модели Клобучара на модель GEMTEC обеспечит более высокую точность определения координат потребителя. Единственным внешним входным параметром, необходимым для функционирования модели GEMTEC является текущий индекс солнечной активности – индекс $F_{10.7}$, характеризующий интенсивность радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см. Соответствующее значение целесообразно передавать в навигационном сообщении ГЛОНАСС/ GPS в виде округленного до целого числа в диапазоне от 60 до 300 единиц. Актуальное значение данного индекса представляется на ряде сайтов в Интернете. В частности, значение $F_{10.7}$ в необходимом формате может быть получено по адресу <http://www.swpc.noaa.gov/forecast.html/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Klobuchar J.A.** Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users // IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System, v.23, №3, 1986.
2. **Горбачев О.А., Иванов В.Б., Ивельская М.К.** Эмпирическое моделирование полного электронного содержания в ионосфере // Космические исследования.- Т. 50.- 2012. - № 1.- С. 42 - 46.
3. **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. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2011, vol.73, p. 1703–1707.
4. **Ivanov V B., Oleg A. Gorbachev, Gregory D. Gefan.** The GEMTEC Model: Assessment of Quality of Ionospheric Correction in Satellite Radio Navigation Systems. Consumer Electronics Times. 2012, Vol.1 No3. Pp. 43 - 46.
5. **Brian Tolman, R. Benjamin Harris.** The GPS Toolkit. Linux Journal. September 2004, p. 72.
6. **Benjamin R. Harris, Richard G. Mach.** GPSTk-An Open Source GPS Toolkit. GPS Solutions, March, 2007, vol. 11, No. 2. Pp. 145–150.

Abstract. The paper focuses on improving the positioning accuracy of single-frequency GNSS equipment by using GEMTEC, a new model of total electron content of ionosphere. The model is tested compared to the standard method applying Klobuchar model.

Key words: GPS, GLONASS, ionosphere, model, correction, positioning, total electron content

Материал поступил 14.11.14