



НОВЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ GPS-ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Н.П. Данилкин, Г.А. Жбанков, Н.Г. Котонаева, В.Б. Лапшин

В настоящее время с каждым годом увеличивается сфера применения использования систем позиционирования с использованием спутниковых систем, а также возрастают требования к их точности. Для компенсации одной из основных причин погрешности – ионосферной задержки сигнала – в данный момент используют упрощенную «модель Клобучара». Хотя современные вычислительные мощности позволяют рассчитывать ее значения напрямую из модельных траекторных расчетов с использованием максимально приближенной к реальности модели ионосферы. В работе на основе траекторных расчетов проводится исследование влияния на величину ионосферной задержки как глобального распределения электронной концентрации, так и различных типов нерегулярных неоднородных структур, присутствующих в ионосфере.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИОНОСФЕРА, СИСТЕМА СПУТНИКОВОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ, ТРАЕКТОРНЫЕ РАСЧЕТЫ, НЕОДНОРОДНЫЕ СТРУКТУРЫ, ИОНОСФЕРНАЯ ЗАДЕРЖКА СИГНАЛА.

1 ВВЕДЕНИЕ

Принцип глобального позиционирования с использованием спутниковой системы открыл новые эффективные возможности для решения задач по определению местоположения в различных целях (транспортной, геодезической и др.). С развитием электронных систем количество пользователей постоянно увеличивается, а требования к качеству и точности определения местоположения возрастают. Одним из основных факторов приводящим к системным ошибкам является ионосферное воздействие на спутниковые сигналы, наиболее заметно проявляющееся в ионосферной задержке. Для ограничения такого рода негативного влияния внешних факторов с целью повышения точности и эффективности спутникового позиционирования были предложены способы ее компенсации. Они основаны на расчете предполагаемого значения ионосферной задержки с использованием ионосферной модели.

В качестве глобальной модели ионосферы GPS, на основе которой одночастотный потребитель системы GPS может осуществлять ионосферную коррекцию, в настоящее время используется сильно упрощенная «модель Клобучара» [1]. Мотивация для упрощения объясняется желанием сделать расчетное выражение проще, что было важно для процессоров 1970-х. Согласно исследованиям, применение модели ионосферы GPS позволяет уменьшить, как минимум, на 50% влияние ионосферы на среднеквадратическую погрешность определения координат НАП. Погрешность модели ионосферы GPS в средних широтах составляет $9.8 \text{ м} \div 19.6 \text{ м}$ [2] в течение суток и намного больше при высокой солнечной активности. Для авроральных и экваториальных областей значение ошибки будет еще выше. Таким образом, эта модель ионосферы не позволяет с высокой точностью устранить влияние ионосферы на сигналы НКА.

С развитием вычислительных мощностей создались условия для более точного вычисления реальной ионосферной задержки на основе прямых траекторных расчетов с использованием коррекции ионосферных моделей, что, соответственно, должно привести к более точной ее компенсации при процедуре позиционирования.

Целью настоящей работы является изучение влияния ионосферы, представленной моделью, наиболее близкой к реальной, на траектории распространения радиоволн на трассе «навигационный спутник – наземный приемник» и величину ионосферной задержки. Также будет исследовано влияние нерегулярных ионосферных структур, практически постоянно присутствующих на высотах максимума слоя F2 – крупных одиночных неоднородностей и волновых возмущений типа ПИВ.

Также на предварительном этапе будет рассмотрен вопрос двух основополагающих факторов, влияющих на точность расчетов:

- выбор наиболее оптимальной методики траекторных расчетов;
- выбор модели ионосферы, по которой будет определяться электронная концентрация в каждой расчетной точке траектории.

2 МЕТОДИКА ТРАЕКТОРНЫХ РАСЧЕТОВ

На данном этапе будет проведено исследование и выбор методики проведения траекторных расчетов численными методами. Задача будет рассмотрена по двум направлениям:

- выбор наиболее эффективного численного метода для проведения траекторных расчетов;
- возможность использования упрощения изотропного представления ионосферы при описании среды распространения.

Расчеты распространения радиоволн в ионосфере аналитическими или квази-аналитическими методами возможны только для небольшого числа случаев, когда ионосферу можно заменить крайне упрощенными моделями и пренебречь влиянием магнитного поля и ее неоднородной структурой. Однако, поставленная перед нами задача требует максимального приближения модели к реальным условиям. В этих случаях расчет траекторий возможен только численными методами.

Наилучшим приближением волнового уравнения в случае ионосферы, по-видимому, является метод геометрической оптики [3]. Было разработано несколько методов для амплитудно-траекторных расчетов в возмущенной среде в данном приближении: метод Смита [4], метод рефракционного интеграла [5], метод характеристик [3,6]. Наиболее последовательно и эффективно в рамках геометрооптического приближения задача нахождения траекторных и энергетических характеристик в данном случае реализуется на пути решения расширенной системы характеристических уравнений (метод характеристик).

Остановимся на нем подробнее. Используя уравнение эйконала в виде

$$\mathcal{H}(\mathbf{k}, \mathbf{r}) = \frac{1}{2} [k^2 - n^2] = 0, \quad (1)$$

получим систему дифференциальных уравнений для нахождения траекторий в виде:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{r}}{d\tau} = \mathbf{p} - \frac{1}{2} \frac{\partial n^2}{\partial \mathbf{p}} = \mathbf{p} - \frac{1}{2} \frac{\partial n^2}{\partial \cos \beta} \cdot \mathbf{h}' \\ \frac{d\mathbf{p}}{d\tau} = \frac{1}{2} \frac{\partial n^2}{\partial \mathbf{r}} \end{cases} \quad (2)$$

где τ – независимая вспомогательная переменная, $\mathbf{r} = \{x, y, z\} = \{x_i\}$ – радиус-вектор в декартовой

системе координат, $\mathbf{p} = \frac{\mathbf{k}}{|\mathbf{k}_0|} = \{p_i\}$ – нормированный волновой вектор, $|\mathbf{k}_0| = k_0 = \omega/c$,

$\mathbf{h}' = \frac{\partial \cos \beta}{\partial \mathbf{p}} = \frac{1}{|\mathbf{p}|} \left(\mathbf{h} - \frac{\mathbf{p}}{|\mathbf{p}|} \cos \beta \right)$, $\mathbf{k} = |\mathbf{k}| (\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta)$, $\mathbf{h} = (0, \sin \alpha, \cos \alpha)$, α – угол

между вертикалью и магнитным полем, $\beta = (\mathbf{k}, \mathbf{h})$, n – показатель преломления падающей волны, который в магнитоактивной плазме выглядит следующим образом:

$$n^2 = 1 - \frac{2\nu(1-\nu)}{2(1-\nu) - u \sin^2 \beta \pm \sqrt{u^2 \sin^4 \beta + 4u(1-\nu)^2 \cos^2 \beta}}. \quad (3)$$

Пошаговое решение данной системы с заданными начальными условиями приводит к нахождению траектории распространения радиоволны в неоднородной магнитоактивной плазме.

В общем случае криволинейных координат уравнения для нахождения траекторий, позволяющие учесть анизотропию, неоднородность и нестационарность ионосферной плазмы, примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{d\tau} &= \frac{1}{r \cdot \sin \theta} \left\{ k_\varphi - \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial k_\varphi} \right\}; \\ \frac{d\theta}{d\tau} &= \frac{1}{r} \left\{ k_\theta - \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial k_\theta} \right\}; \\ \frac{dr}{d\tau} &= k_r - \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial k_r}; \\ \frac{dk_\varphi}{d\tau} &= \frac{1}{r \cdot \sin \theta} \left\{ \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial \varphi} - k_\varphi \sin \theta \frac{dr}{d\tau} - r k_\varphi \cos \theta \frac{d\theta}{d\tau} \right\}; \\ \frac{dk_\theta}{d\tau} &= \frac{1}{r} \left\{ \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial \theta} - k_\theta \frac{dr}{d\tau} + r k_\varphi \cos \theta \frac{d\varphi}{d\tau} \right\}; \\ \frac{dk_r}{d\tau} &= \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial r} + k_\theta \frac{d\theta}{d\tau} + k_\varphi \sin \theta \frac{d\varphi}{d\tau}. \end{aligned} \quad (4)$$

Кроме того, расчет ионосферной задержки предполагает решение граничной задачи на трассе «навигационный спутник – наземный приемник». В случае трехмерно-неоднородной среды оно состоит в нахождении такого набора полярного и азимутального углов волнового вектора в момент излучения (Δ_0, α_0) , при которых траектория луча проходит через точку приема (θ_1, φ_1) . Для этого необходимо найти решение системы нелинейных уравнений

$$\begin{cases} \theta(f, \Delta_0, \alpha_0) = \theta_1 \\ \varphi(f, \Delta_0, \alpha_0) = \varphi_1 \end{cases}, \quad (5)$$

где f – рабочая частота. Для используемых частот данная система имеет единственное решение, которое может быть найдено численно с помощью, например, модифицированного метода Ньютона.

3 СРАВНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ

Процедура определения траекторных характеристик требует большого количества вычислений (а, соответственно, машинного времени), поскольку оператор отображения строится путем численного интегрирования системы дифференциальных уравнений. Поэтому сразу же возникает проблема выбора эффективного численного метода интегрирования.

Эффективность численного алгоритма складывается из двух составляющих: точности и быстродействия. Алгоритм эффективен, если при фиксированной точности он обладает наибольшим быстродействием по сравнению с другими алгоритмами.

Мерой быстродействия численного метода является количество перевычислений функций правых частей уравнений на интервале интегрирования.

Точность численного интегрирования системы дифференциальных уравнений определяется несколькими факторами.

Во-первых, это точность самого численного метода. Она определяется порядком аппроксимирующей формулы, и повышение этого порядка уменьшает локальную ошибку метода, т.е. ошибку, допускаемую на каждом шаге интегрирования. Повышение порядка метода позволяет не только уменьшить глобальную ошибку, но и увеличить шаг интегрирования, не проигрывая в точности на каждом шаге, что, в свою очередь, приводит к уменьшению ошибок округления и сокращает время вычислений. Следует отметить, что повышение порядка метода обычно приводит к улучшению свойств устойчивости метода.

Во-вторых, это сама система дифференциальных уравнений, описывающая траекторию радиоволны. Функции правых частей этих уравнений связаны с профилем электронной концентрации в ионосфере, что приводит к их сильно неравномерному изменению вдоль траектории, особенно в условиях возмущенного состояния. При численном решении задачи такая неравномерность приводит к нерациональному дроблению шага интегрирования на слабоизменяющихся участках, что в свою очередь снижает точность численного интегрирования и увеличивает затраты машинного времени.

Основываясь на результатах работе [7], в которой были проведены исследования численных алгоритмов для распространения КВ-радиоволн на наклонных трассах, были протестированы следующие методы, основанные на различных принципах построения схемы вычислений:

- s -стадийные явные одношаговые методы Рунге-Кутта-Фельдберга, использующий для контроля $s+1$ стадийный метод порядка $p+1$ [8];
- явный одношаговый многостадийный метод Дормана-Принса [9];
- экстраполяционные методы Грега-Булирша-Штера [10];
- предикторно-корректорную схему Адамса-Башфорта-Мултона (метод прогноза и коррекции) [11];
- реализация предикторно-корректорной схемы методом Гира [12].

Исследуемые методы тестировались и сравнивались по следующим параметрам:

- эффективность счёта – по временным затратам;
- качество результатов – точность нахождения точки прихода должна сходиться к общему значению.

Тестирование проводилось на двух моделях различной сложности, основанных на модели NeQuick:

- 2D модель, в которой изменения профиля электронной концентрации задается только вдоль трассы, соединяющей проекцию положения спутника на поверхность земли и приемник. Сама трасса представляет собой дугу большого круга, проходящего через точки излучения, приема и центр Земли. Расчеты проводятся в изотропном приближении без учета влияния магнитного поля;
- 3D модель, учитывающая неоднородную структуру ионосферы как по широте, так и по долготе. Расчеты проводятся с прямым учетом влияния магнитного поля на траекторию радиоволн.

После проведения тестов для всех комбинаций начальных условий, методов и погрешностей было определено, что в числе лучших можно назвать следующие методы:

- метод Рунге-Кутты-Фельберга порядка 4(5) – RKF4(5);
- метод Дормана-Принса порядка 5(4) – DOPR5(4);
- метод Адамса-Башфорта-Мултона 5-го порядка – ADAMS5;
- метод Гира 6-го порядка – GIR6.

Для каждого из указанных методов далее проводились расчеты траекторий на трассе «навигационный спутник – наземный приемник» для различных значений допустимой погрешности на одном шаге – от 10^{-6} до 10^{-14} , каждый раз уменьшая его в 10 раз.

Сравнение проводилось по двум параметрам:

- быстродействие – основным параметром являлось суммарное время расчета большого набора траекторий с различным полярным углом прихода от 15 до 90 градусов;
- точность интегрирования. В связи с отсутствием априори известного точного значения мы руководствовались следующими логичными предположениями, подтвержденными дальнейшим моделированием. С уменьшением допустимой погрешности на каждом шаге интегрирования конечный результат в большинстве случаев должен сходиться к некоторому общему для всех методов значению, которое и можно принять за «точное». Таким образом, точность решения можно определить как разность между полученной величиной и «точным» значением.

В ходе моделирования выявилась еще одна особенность, характерная для расчета таких траекторий. В связи с тем, что большая часть распространения приходится на большие высоты, где изменение электронной концентрации мало, шаг метода при заданной погрешности может сильно увеличиваться. В результате конечная ошибка может достигать значительных величин, недопустимых для поставленных целей. Таким образом, необходимо при расчетах также ввести контроль за максимальным шагом интегрирования.

Результаты исследований указывают, что в качестве оптимального алгоритма расчета траекторий на трассе «GPS-спутник – наземный приемник» в методе характеристик следует использовать явный одношаговый метод Рунге-Кутты-Фельберга порядка 4(5) или предикторно-корректорную схему Адамса пятого порядка (при задании максимального шага интегрирования 2 км точность метода может быть на уровне 10^{-6} – 10^{-7} а для максимального шага 20 км необходимо задавать точность метода 10^{-12} – 10^{-13}). При таких условиях точность решения граничной задачи составляет менее 0.5 м. Время расчета одной траектории на ПК со средним по быстродействию процессором занимает не более 0.1 сек.

В процессе тестирования дополнительно был получен следующий результат. В подавляющем большинстве смещение траекторий относительно дуги большого круга незначительно. Если, к тому же, учесть, что боковое смещение практически не влияет на величину группового времени распространения радиоволн (а именно этот параметр используется в процедуре позиционирования), то можно утверждать, что двумерное приближение можно использовать при разработке рекомендаций по расчету траекторий на трассе «навигационный спутник – наземный приемник».

4 ИЗОТРОПНОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ ОПИСАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Второй целью была проверка возможности использования упрощения изотропного представления ионосферы при описании среды распространения.

Это связано с тем, что в таком случае формула для показателя преломления (3) принимает вид:

$$n^2 = 1 - v. \quad (5)$$

При этом обнуляются производные $\frac{\partial n^2}{\partial u}$ и $\frac{\partial n^2}{\partial \cos \beta}$, а $\frac{\partial n^2}{\partial v} = -1$. Следовательно, правая часть

системы (4) заметно упрощается, что приводит к значительному ускорению скорости расчета как на каждом шаге, так и для траектории в целом.

Для проверки использовался расчет вертикальных траекторий распространения радиоволн на трассе «навигационный спутник – наземный приемник». Сравнение проводилось для величины превышения группового пути (действующего расстояния) относительно реального расстояния между передатчиком и приемником dR . Кроме того, сравнивались значения dR для обыкновенной и необыкновенной компонент при учете магнитного поля.

В процессе исследования было проведено более 1000 расчетов для различных географических координат положения приемника и различных временных параметров.

Результаты можно обобщить следующим образом:

- различие в величине dR для обыкновенной и необыкновенной компонент при учете магнитного поля составляет не более 0.01 м, что позволяет при практических расчетах пренебречь эффектом расщепления ЭМВ на две магнитоионные компоненты;
- различие в величине dR при расчетах в магнитоактивной среде и при использовании упрощения изотропного представления ионосферы составляет не более 0.005 м. Причем значение величины действующего расстояния при изотропном приближении лежит между аналогичными значениями для о- и х-компонент, полученных при расчетах в магнитоактивной среде.

Все вышеперечисленное позволяет утверждать, что упрощение путем изотропного представления ионосферы позволяет с достаточной точностью описывать среду при расчетах распространения радиоволн на трассе «навигационный спутник – наземный приемник». Данное приближение можно использовать с целью ускорения расчета траекторий при проведении большого объема вычислений.

Результаты сравнения на различных трассах показывают, что использование двумерного приближения в изотропной среде дает выигрыш во времени траекторных расчета в 3-4 раза по сравнению с максимально точным описанием условий распространения. В то же время разница в результатах составляет менее 0.3 м, что гораздо меньше допустимых погрешностей.

5 ВЫБОР ИОНОСФЕРНОЙ МОДЕЛИ

Ниже представлены результаты исследования различных моделей ионосферы с целью выбора наилучшей для целей моделирования и корректировки с учетом особенностей поставленной задачи.

Одним из основных условий является возможность определения с помощью выбранной модели электронной концентрации в каждой расчетной точке траектории, вплоть до высот нахождения спутника (20000 км).

Кроме того, в настоящее время при прогнозе характеристик распространения радиоволн в ионосфере используются различные модели (IRI, NeQuick, SIMP, IRI-Plas и др.). Однако все они являются моделями медианного типа и не могут учитывать влияния особенностей в конкретный момент времени в заданном пункте. Поэтому необходимо иметь возможность коррекции основных параметров, задающих состояние ионосферы в данный момент времени в выбранной точке. К таким параметрам относятся:

- критическая частота и высота максимума слоя E;
- критическая частота и высота максимума слоя F1 (если он присутствует);
- критическая частота и высота максимума слоя F2;
- дополнительные параметры (например, параметры V0, V1, уровень F-рассеяния и др.)

Исходя из изложенных выше обстоятельств, сравнение имеющихся моделей будет проводиться по двум критериям:

- качество описания верхней части ионосферы выше высоты максимума слоя F2;
- наличие параметров, доступных для коррекции.

Для детального сравнения и отбора были выбраны следующие широко используемые на практике модели:

- IRI-2016 (International Reference Ionosphere – Международная Справочная Модель Ионосферы) относится к эмпирическим моделям ионосферы и в настоящее время является наиболее разработанной и динамично развивающейся моделью. В настоящее время существует целый ряд версий IRI, последняя из которых датируется 2016 годом [13,14]. Она широко используется для определения основных ионосферных параметров foF2, M(3000)F2, foF1, foE, а также высотного профиля электронной концентрации (в диапазоне высот от 60 до 2000 км). К достоинствам модели можно отнести доступность в модели IRI-2016 ручной коррекции всех основных параметров ионосферы и, как следствие, возможность наиболее точного восстановления профиля электронной концентрации до высоты максимума слоя F2. Также модель предлагает несколько вариантов задания профиля верхней ионосферы. Основным недостатком является низкая верхняя граница расчета профиля электронной концентрации (2000 км);
- IRI-Plas (International Reference Ionosphere and Extensions to Plasmasphere) является расширением модели IRI на высоты плазмосферы вплоть до требуемой высоты орбиты GPS 20000 км [15,16]. Параметры верхней части профиля электронной концентрации рассчитываются на основании значений ПЭС, полученных из имеющихся или прогнозных данных. Соответственно, и коррекция этого участка профиля проводится, помимо обычных параметров, по данным реального значения ПЭС. К недостаткам можно отнести уменьшение числа возможных параметров коррекции для нижней части профиля. Кроме того, большие различия в абсолютных значениях ПЭС, получаемых в разных центрах обработки, могут привести к сильной зависимости значений электронной концентрации на высотах более 1000 км от выбранной базы данных значений ПЭС;
- NeQuick – эмпирическая модель ионосферы, которая предназначена, в первую очередь, для вычисления ПЭС вдоль луча от навигационного спутника до пункта наблюдения [17-19]. В модели NeQuick используются данные глобальной сети ионозондов, а также индексы солнечной активности (например, число солнечных пятен). Модель NeQuick позволяет получать профили электронной концентрации до высот 20 000 км в зависимости от времени и географических координат. Недостатком являются ярко выраженная

временная дискретизация модели (минимальный шаг изменения – 1 час), не очень детально проработанный профиль электронной концентрации на высотах ниже максимума HmF2 (например, отсутствие четко выраженной области долины). Кроме того, практически полная невозможность коррекции базового варианта модели по реальным значениям ионосферных параметров также затрудняет ее использование;

- SIMP (System of Ionosphere Monitoring and Prediction – Система мониторинга и долгосрочного прогноза месячного медианного состояния ионосферы) разработана в рамках совместных работ, проводимых в ИПГ и ИЗМИРАН [20,21]. Она является, своего рода модификацией модели NeQuick. В лучшую сторону по сравнению со всеми остальными рассмотренными моделями ее отличает широкое использование спутниковых данных при расчете основных параметров слоя F2. Значительное увеличение «точек диагностики» позволяет воспроизводить более тонкую структуру зависимости foF2 и HmF2 от координат;
- комбинированная модель, соединяющая в себе преимущества и нивелирующей недостатки базовых моделей. К таким можно отнести модель, в нижней части которой профиль рассчитывается по IRI-2016, а верхняя часть – по NeQuick. Кроме того, в качестве параметров foF2 и HmF2 можно использовать данные модели SIMP-1.

Сравнение указанных выше моделей проводилось в различных географических точках, где расположены ионосферные станции. Это делалось с целью получить возможность коррекции модельных профилей электронной концентрации по экспериментальным данным.

В качестве типичного примера приведем результаты для станции вертикального зондирования DPS-4 MO155 в п. Москва (55.5°N, 37.3°E). 29.01.2018 в 11.16UT там была получена следующая ионограмма (рис.1). На ней также представлены полученные конкретные основные ионосферные параметры для этих условий.

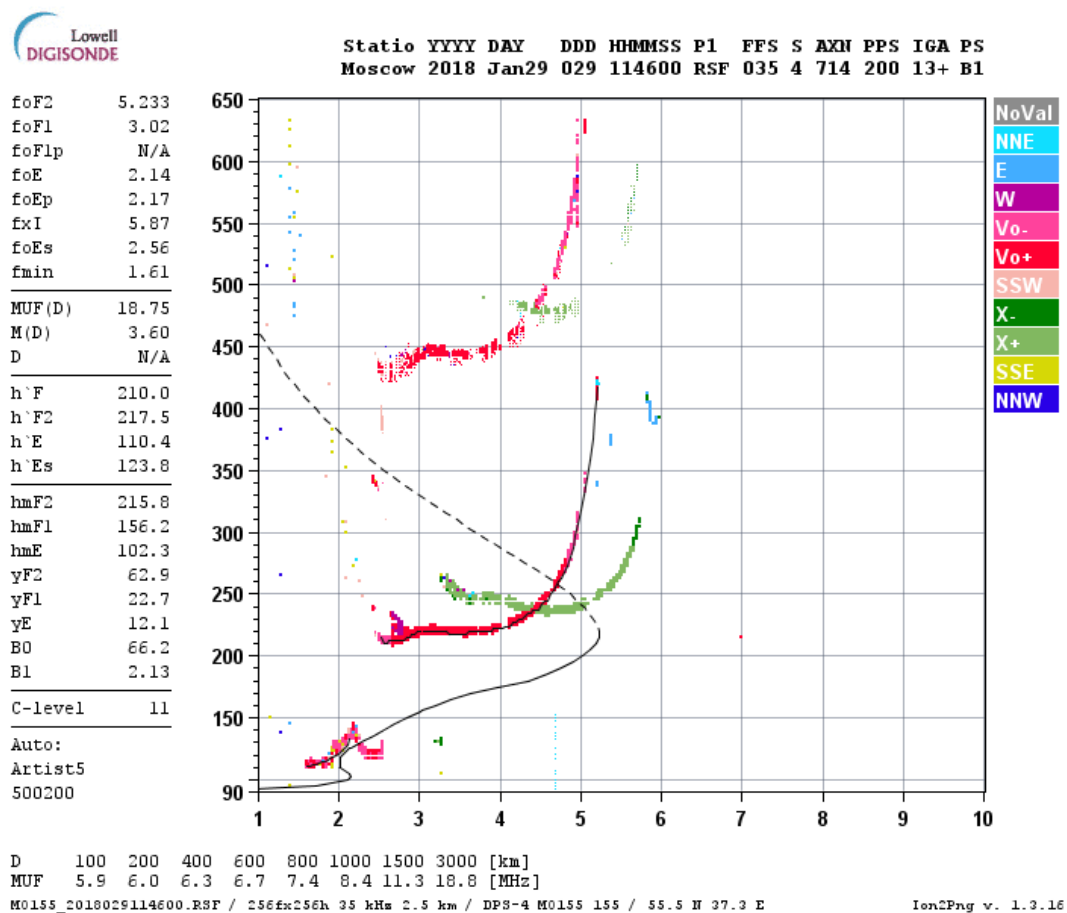


Рис. 1. Ионограмма DPS-4, полученная в п. Москва (55.5°N, 37.3°E). 29.01.2018 в 11.46 UT.

Сначала нами были рассчитаны профили электронной концентрации для рассмотренных моделей в базовом варианте (рис.2). Для наглядности ось высот приведена в логарифмическом масштабе.

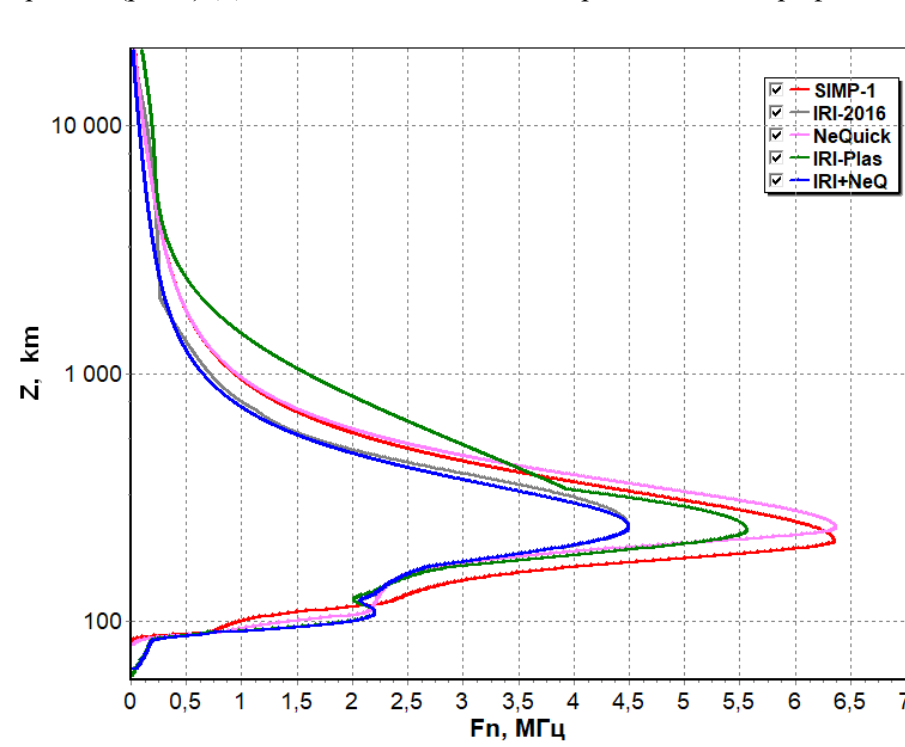


Рис. 2. Вертикальные профили плазменной частоты, рассчитанные по различным ионосферным моделям в базовом варианте для п. Москва (55.5°N, 37.3°E). 29.01.2018 в 11.46 UT.

Видно, что максимальное различие наблюдается в значении параметра foF2. Разница достигает 2 МГц. Однако, форма профиля у всех профилей, за исключением модели IRI-Plas на высотах выше максимума слоя F2, примерно одинакова.

Далее были рассчитаны такие же профили, но с учетом значений основных параметров, полученным из ионограммы (рис.3).

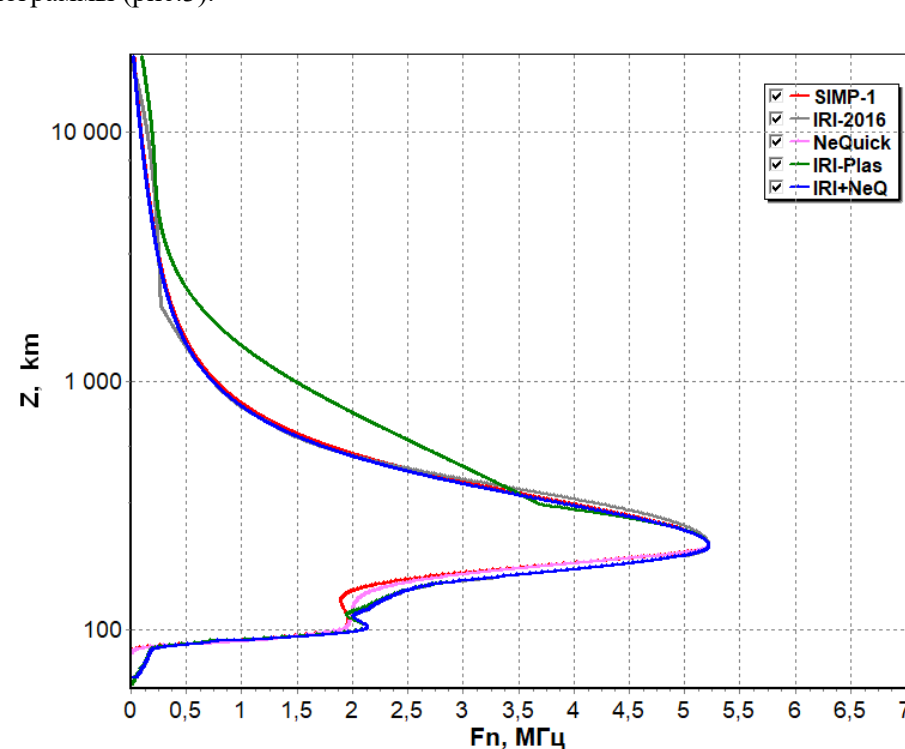


Рис. 3. Вертикальные профили плазменной частоты, рассчитанные по различным ионосферным моделям с учетом коррекции для п. Москва (55.5°N , 37.3°E). 29.01.2018 в 11.46 UT.

Рисунок 3 наглядно подтверждает хорошее совпадение результатов всех моделей (исключение составляет модель IRI-Plas).

Другим методом сравнения является расчет вертикального ПЭС и сопоставление его с экспериментальными значениями из глобальной карты IONOLAB (данные взяты с сайта *Ionolab.org*). Результаты таких расчетов в течение нескольких дней подряд для моделей с учетом коррекции представлены на рис.4.

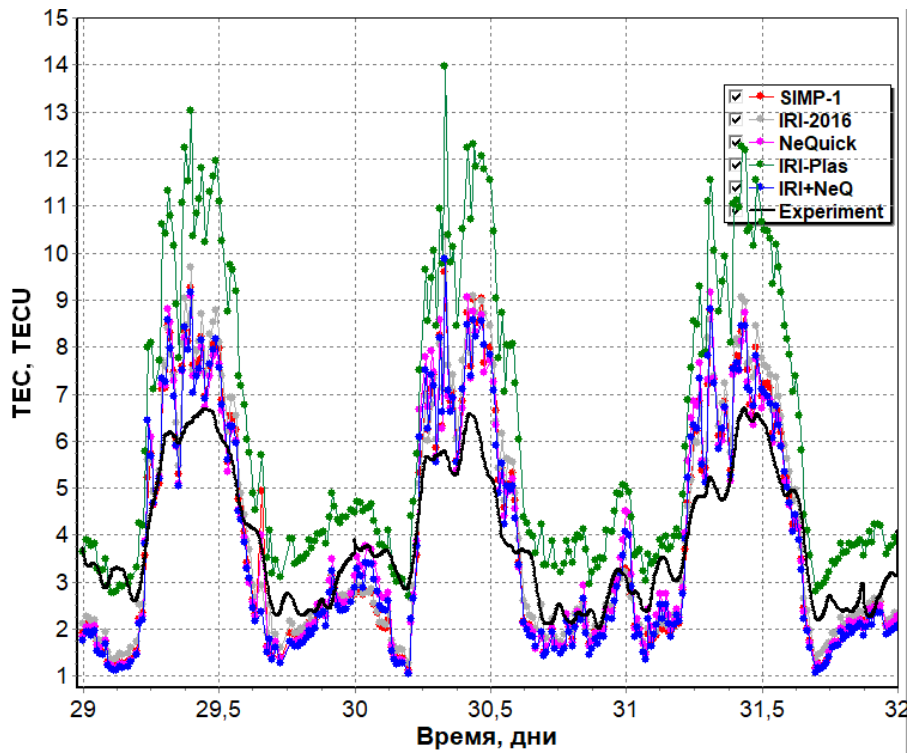


Рис. 4. Результаты расчетов вертикального ПЭС для моделей с учетом коррекции и сравнение с экспериментальными данными (черная кривая) для п. Москва (55.5°N , 37.3°E). 29-31.01.2018.

Из рисунка 4 видно, что, как и ранее, качественно значения для разных типов моделей практически совпадают и неплохо соответствуют эксперименту.

Количественно исключение, как и в предыдущем случае, составляет модель IRI-Plas. Для нее значения ПЭС, особенно в дневное время, сильно завышены. Однако, стоит заметить, что кроме используемой карты существуют и другие аналогичные карты, созданные различными лабораториями (например, JPL, IGS, GIM и др.). Довольно часто разница ПЭС в результатах, получаемых с помощью разных карт составляет по величине до 5 TECU и более. Поэтому количественный анализ на основе таких данных может иметь ошибочный характер.

Исходя из результатов, представленных в данном разделе, можно сделать следующий вывод. При использовании большинства рассмотренных моделей восстановленные вертикальные профили электронной концентрации, особенно при использовании процедуры коррекции, практически совпадают. Исключение составляет модель IRI-Plas, для которой верхняя часть профиля дает завышенные значения. Таким образом, при работе можно использовать произвольную модель. Ее конкретный выбор может зависеть от дополнительных условий.

6 ВЛИЯНИЕ ИОНОСФЕРЫ НА РАСЧЕТ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗАДЕРЖЕК СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ

Основной целью данной работы является изучение влияния ионосферы и ее неоднородных структур на величину задержки навигационных сигналов. Детально рассмотрим данный вопрос на примере п. Москва (55.5°N , 37.3°E) и используем для этих целей экспериментальные данные, полу-

ченные на ионосферном комплексе MO155, оснащённом дигизондом DPS-4. 27.09.2017 в 11.16 UT была получена следующая ионограмма (рис.5)

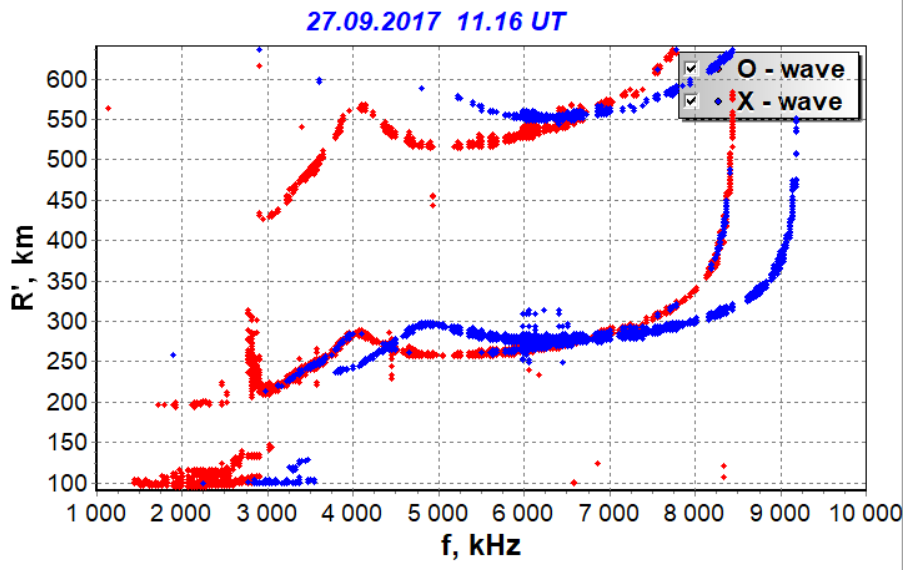


Рис. 5. Ионограмма DPS-4, полученная в п. Москва (55.5°N, 37.3°E). 27.09.2017 в 11.16 UT. Красный цвет соответствует о-компоненте, синий – х-компоненте.

В результате ее автоматической обработки были получены следующие основные параметры, описывающие состояние ионосферы:

- критическая частота слоя E $foE=2.737$ МГц;
- высота максимума слоя E $HmE=95.0$ км;
- критическая частота слоя F1 $foF1=4.005$ МГц;
- высота максимума слоя F1 $HmF1=169.3$ км;
- критическая частота слоя F2 $foF2=8.488$ МГц;
- высота максимума слоя F1 $HmF2=259.3$ км;
- параметры $B0=81.85$;
- параметры $B1=1.87$;

В качестве модели ионосферы была выбрана комбинированная модель, в нижней части которой профиль рассчитывается по IRI-2016, а верхняя часть – по NeQuick. Профиль электронной концентрации, рассчитанный по ней, представлен на рис.6 синим цветом. На нем же красным цветом отображен профиль, полученный при учете экспериментально полученных основных параметров ионосферы, приведенных выше. Для большей наглядности ось высот приведена в логарифмическом формате.

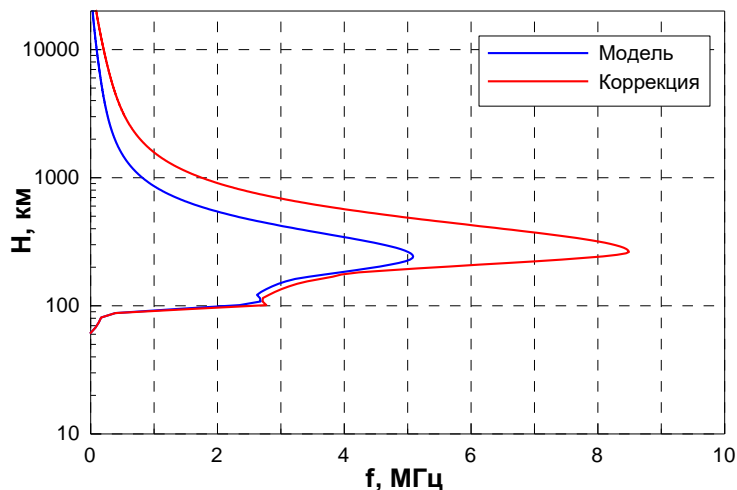


Рис. 6. Профиль электронной концентрации для п. Москва (55.5°N, 37.3°E), 27.09.2017 в 11.16 UT.

Синим цветом показан профиль, предлагаемый моделью, красным – рассчитанный по той же модели с учетом значений основных параметров ионосферы, полученных по экспериментальной ионограмме вертикального зондирования.

Значение ионосферной задержки dR навигационного сигнала на частоте 1575,42 МГц вычислялась как разность между групповым путем луча на трассе «навигационный спутник – наземный приемник» и фактическим расстоянием между конечными точками. Траекторные расчеты проводились без учета различных упрощений в предположении трехмерно-неоднородной магнитоактивной среды в сферической системе координат. Сначала моделирование проводилось для условий состояния ионосферы, которые предлагаются моделью. Проекция траектории в ее нижней части на плоскость большого круга (определяемого конечными точками траектории и центром Земли) и двумерный профиль электронной концентрации в этом разрезе показан на рис. 7а. Аналогичный профиль на высоте $H = HmF2 = 240$ км и проекция траектории распространения на горизонтальную плоскость представлены на рис. 7б.

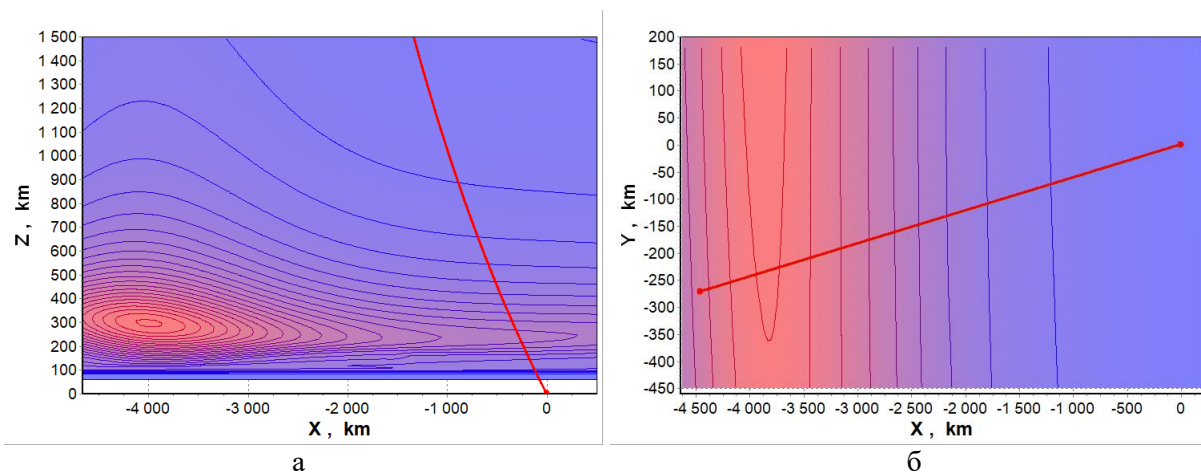


Рис. 7. Проекция траектории луча и двумерный контур электронной концентрации в плоскости большого круга (а) и на высоте $HmF2=260$ км (б).

Далее использованная модель подвергалась процедуре коррекции по экспериментальным данным, методика которой была разработана авторами и подробно описана в [22]. В результате были получены следующие величины ионосферной задержки:

- в модели без коррекции $dR=2.37$ м;
- в модели с учетом коррекции $dR=7.59$ м.

Сопоставление результатов показывает, что простое использование развитой современной ионосферной модели без учета реальных экспериментальных данных может привести к заметным погрешностям даже в условиях спокойной ионосферы, что, соответственно, приведет к неточности определения местоположения приемника.

7 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований было показано, что отсутствие учета ионосферной задержки при определении местоположения с использованием навигационных спутников дает результаты, отличающиеся большой погрешностью. Для учета ионосферной задержки была разработана методика расчета траекторий в частотном диапазоне навигационных спутников. На основе численного моделирования предложены оптимальные параметры численных методов для расчета траекторий распространения РВ применительно к трассам «навигационный спутник – GPS-приемник» и используемого диапазона частот.

А именно:

- использование современных моделей ионосферы с возможностью коррекции основных ионосферных параметров;
- расчет траекторий необходимо проводить путем численного решения расширенной системы характеристических уравнений на основе приближения геометрической оптики;

- при численных расчетах предпочтительно использовать явный одношаговый метод Рунге-Кутты-Фельберга порядка 4(5) или предикторно-корректорную схему Адамса пятого порядка. Допустимая погрешность метода на одиночном шаге не должна превышать 10^{-10} .

Показано, что большинство современных моделей ионосферы достаточно хорошо описывают качественное распределение электронной концентрации.

Дальнейшее моделирование показало:

- использование ионосферных моделей без учета экспериментальных данных может приводить к значительным ошибкам при определении величины ионосферной задержки;
- с целью коррекции ионосферы можно использовать уже существующие методики;
- присутствие на пути луча мощных крупномасштабных неоднородностей может привести к аномальному увеличению значения ионосферной задержки (до 10 м);
- наличие в ионосфере возмущений типа ПИВ слабо влияет на задержку сигналов в абсолютных величинах, но может привести к погрешности в определении положения приемника.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 18-05-80023.

Результаты получены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 3.9696.2017 / 8.9.

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. *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard*, U.S. Department of Defense, October, 2008. 160 p. <http://www.gps.gov/technical/ps/2008-SPS-performance-standard.pdf>
3. *Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И.* Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980, 304 с.
4. *CCIR. Supplement to report 252-2.* – Geneva: 1982, 38 p.
5. *Кияновский М.П., Зырянова Л.А.* и др. Метод рефракционного интеграла и его применение к расчету радиотрасс // *Техника средств связи. Сер.СС.* – М.: 1987, вып.5, С.4-13.
6. *Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г.* Применение метода характеристик для решения на ЭВМ задач распространения электромагнитных волн в неоднородных анизотропных средах // В кн. «Лучевое приближение и вопросы распространения радиоволн», Изд-во «Наука», 1971, С.265-279.
7. *Жбанков Г. А., Анишин М. М.* Сравнительный анализ численных методов, применимых для расчета траекторных характеристик КВ-радиотрасс // *Техника радиосвязи.* 2016. Вып. 4 (31). С. 41–51.
8. *Fehlberg E.* Classical fifth-, sixth-, seventh-, and eighth order Runge-Kutta formulas with step size control. // *Computing* – 1969 –V.4. – P.93–106.
9. *Хайпер Э., Нёрсетт С., Ваннер Г.* Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. – М.: Мир, 1990, 512 с.
10. *Bulirsch R., Stoer J.* Fehlerabschätzung und Extrapolation mit rationalen-Funktionen bei Verfahren vom Richardson-Typus. // *Num. Math.*, –1964, – V.6, – P.413-427.
11. *Хемминг Р. В.* Численные методы для научных работников и инженеров / Пер с англ.; под редакцией Р.С.Гутера – Гл.ред.физ.-мат.лит. – 1968. – 203 с.
12. *Gear C. W.* The automatic integration of ordinary differential equations. // *Communications of the ACM*, – v.14, – N3 (March 1971), – P.176-179.
13. *Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V., Richards P., McKinnell L., Reinisch B.* The International Reference Ionosphere 2012 – a model of international collaboration // *J. Space Weather Space Clim.* V.4. A07. 2014. <http://dx.doi.org/>. doi 10.1051/swsc/2014004
14. *Bilitza D., Altadill D., Reinisch B., Galkin I., Shubin V., Truhlik V.* The International Reference Ionosphere: Model Update 2016 / *Geophysical Research Abstracts.* V. 18. EGU2016-9671. 2016.
15. *Gulyaeva, T.L., and Bilitza, D.* Towards ISO Standard Earth Ionosphere and Plasmasphere Model. In: "New Developments in the Standard Model", NOVA Publisher, 2012. pp.1-39.
16. *Gulyaeva T.L. et al.* TEC proxy index of solar activity for the International Reference Ionosphere IRI and its extension to Plasmasphere IRI-PLAS model // *Int. J. Sci. Eng. Applied Sci.* 2017, V.3, №5, P.144-150,
17. *Leitinger R., Zhang M.L., Radicella S.M.* An improved bottomside for the ionospheric electron density model NeQuick // *Annals of Geophysics*, 2005, V.48, №3, P.525-534.
18. *Nava B., P. Coisson P., Radicella S.M.* A new version of the NeQuick ionosphere electron density model // *J. of Atmos. and Solar-Terr. Physics.* 2008. V.70. P.1856-1862. doi: 10.1016/j.jastp.2008.01.015. 2008.
19. *Radicella S. M.* The NeQuick model genesis, uses and evolution // *Annals of Geophysics.* 2009. V. 52, №3/4. P.417–422.

20. Михайлов А.В. Описание и пробная эксплуатация системы мониторинга и долгосрочного прогноза фоновое состояние ионосферы (SIMP-1) // Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, 2010, 123 с.
21. Лецинская Т.Ю., Михайлов В.В. Модель SIMP-1: картирование месячных медиан foF2 по северному полушарию // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56. № 6. С. 772–780.
22. Данилкин Н.П., Жбанков Г.А., Тасенко С.В. Восстановление трёхмерного поля плотности электронов по результатам модельного эксперимента с участием бортового ионозонда и двух наземных ионозондов // Гелиогеофизические исследования. 2014, №7. С.43-55.

NEW APPROACH TO SOLVING THE PROBLEM OF IMPROVING GPS-POSITIONING ACCURACY

Danilfin N.P., Zhbankov G.A., Kotonaeva N.G., Lapshin V.B.

Currently, every year the scope of use of positioning systems using satellite systems is increasing, and the requirements for their accuracy are increasing. To compensate for one of the main causes of error - the ionospheric signal delay - at the moment they use a simplified “Klobuchar model”. Although modern computational capabilities allow us to calculate its values directly from model trajectory calculations using the ionosphere model as close to reality as possible. In the work, on the basis of trajectory calculations, a study is conducted of the influence on the magnitude of the ionospheric delay both of the global distribution of electron concentration and of various types of irregular heterogeneous structures present in the ionosphere.

KEYWORDS: IONOSPHERE, SYSTEM OF SATELLITE POSITIONING, TRAJECTOR CALCULATIONS, INHOMOGENEOUS STRUCTURES, IONOSPHERIC SIGNAL DELAY