

МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОСФЕРЫ, ВЫЗВАННЫХ ДВИЖЕНИЕМ МКС, ПО ДАННЫМ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

К.А. Осипов, А.Б. Ишин

Иркутский национальный исследовательский университет, Иркутск, Россия, nikkie.33302@gmail.com

A METHOD FOR RECORDING LOCAL DISTURBANCES IN THE IONOSPHERIC ELECTRON DENSITY CAUSED BY THE MOVEMENT OF THE ISS USING TOTAL ELECTRON CONTENT DATA

К.А. Osipov, A.B. Ishin

Irkutsk National Research University, Irkutsk, Russia, nikkie.33302@gmail.com

Аннотация. В работе предложен метод обнаружения локальных слабых возмущений электронной концентрации, вызванных пролетом МКС, по данным вариаций ПЭС на трансionoсферных лучах глобальных навигационных спутниковых систем. Метод заключается в пересчете близких возмущений в систему координат, связанную с МКС и статистическом накоплении возмущений для обнаружения их на фоне более амплитудных вариаций ПЭС.

Ключевые слова: электронная концентрация, вариации ПЭС, МКС.

Abstract. The paper proposes a method for detecting local weak disturbances in the electron density caused by the passage of the ISS, based on TEC variations data on transionoсpheric rays of global navigation satellite systems. The method consists of recalculating nearby disturbances into a coordinate system associated with the ISS and statistically accumulating disturbances to detect them against the background of more amplitude TEC variations.

Keywords: electron concentration, variations of the PES, ISS.

ВВЕДЕНИЕ

Обнаружение слабых электронных возмущений в ионосфере с использованием данных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) возможно благодаря тому, что электроны в ионосфере воздействуют на сигналы, идущие от спутников. Проявляется это в изменении фазы и времени распространения сигналов ГНСС. Движение МКС с большой скоростью может вызывать возникновение ударной волны конусообразной формы. При этом взаимодействие указанной волны с веществом (пусть и очень разряженным на высотах МКС) может вызывать возмущение электронной плотности посредством локальных изменений плотности вещества. Указанное возмущение электронной плотности возможно как вследствие изменения скорости рекомбинации ионов и электронов, так и вследствие кратковременного перемещения облака электронов вместе с фронтом волны. Помимо этого, движение МКС может вызывать электродинамические эффекты, такие как: электрические токи и электромагнитные поля, которые могут воздействовать на ионы и электроны в ионосфере [Лисаков и др., 2021].

В целом, такие возмущения могут быть зарегистрированы с помощью радиолокационных и трансionoсферных методов измерений. Однако, важно отметить, что эти изменения обычно являются локальными как по времени, так и по пространству, что усложняет их регистрацию. Так для трансionoсферных методов нужно попадание ионосферной точки (а точнее луча спутник-приемник) в область возмущения. При этом ожидаемый эффект такого возмущения может маскироваться фоновыми возмущениями, которые будут влиять на всю интегральную величину полного электронного содержания (ПЭС).

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Исходными данными для исследования являются файлы наблюдений за состоянием ионосферы, регистрируемые станциями ГНСС в формате RINEX и рассчитанные по файлам TLE значения положения и высоты МКС за определенный период времени (одни сутки). Для правильности расчета взаимного расположения МКС и ионосферных точек при фильтрации данных вариация ПЭС берется среднее значение высоты МКС за сутки (примерно 410 км), так разбег ионосферных точек будет минимален [Афраймович, Перевалова, 2006]

Все исходные данные берутся из открытой базы станций ГНСС geonet. Наблюдения проводятся для новозеландской сети в координатной сетке -30×-60 ° ю.ш. и $150:180$ ° в.д. (сетка может быть любая), так как в этой сети станции регистрируют параметры сигналов от навигационных спутников GPS, ГЛОНАСС, Galileo в постоянном режиме с частотой 1 Гц.

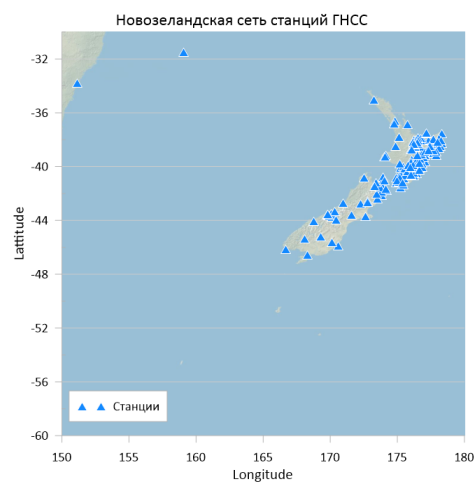


Рис. 1. Новозеландская сеть станций ГНСС

Для удобства сбора данных и наглядности отображения информации необходимо перейти в систему координат, связанную с МКС, где вектор направления движения станции будет направлен на север, а все связанные ионосферные точки будут собраны в координатной сетке ниже. Ионосферные точки, имеющие одинаковое или близкое положение, в зависимости от точности расчета, будут проанализированы одним из методов фильтрации, например скользящим средним.

По рассчитанным из TLE файлов координатам движения МКС можно рассчитать угол поворота ионосферных точек (азимут) для каждого момента времени положения МКС.

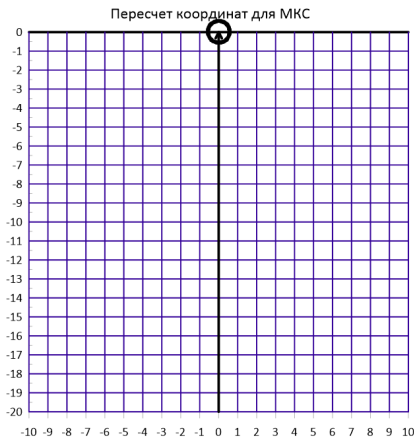


Рис. 2. Система координат МКС

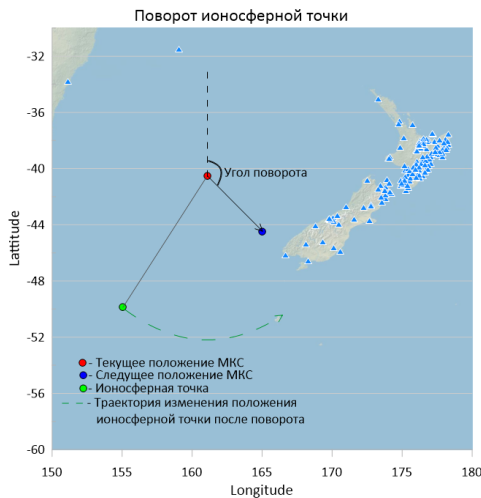


Рис. 3. Поворот ионосферной точки

Начальный азимут можно рассчитать, используя сферическую теорему косинусов. Расстояние на сфере можно рассчитать используя модифицированную формулу гаверсинусов для антиподов.

$\varphi_1, \lambda_1; \varphi_2, \lambda_2$ — широта и долгота двух точек в радианах

$\Delta\lambda$ — разница координат по долготе

$\Delta\sigma$ — угловая разница

Формула гаверсинусов для антиподов:

$$\Delta\sigma = \arctan \arctan \left(\frac{\sqrt{(\cos \cos(\varphi_1) \sin \sin(\Delta\lambda))^2 + (\cos \cos(\varphi_1) \sin \sin(\varphi_2) - \cos \cos(\varphi_1) \sin \sin(\varphi_2) \cos \cos(\Delta\lambda))^2}}{\sin \sin(\varphi_1) \sin \sin(\varphi_1) + \cos \cos(\varphi_1) \cos \cos(\varphi_2) \cos \cos(\Delta\lambda)} \right)$$

Для перевода углового расстояния в метрическое, нужно угловую разницу умножить на радиус Земли, для вычислений используется сфера радиусом 6372795 м, что может привести к ошибке вычисления расстояний порядка 0.5 %.

Формула для расчета начального азимута:

$$Z = \arctan \arctan \left(\frac{\sin \sin(\lambda_2 - \lambda_1) * \cos(\varphi_2)}{(\cos \cos(\varphi_1) \sin \sin(\varphi_2) - \sin(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \cos(\lambda_2 - \lambda_1))} \right),$$

для с. ш.

$$Z = \arctan \arctan \left(\frac{\sin \sin(\lambda_2 - \lambda_1) * \cos(\varphi_2)}{(\cos \cos(\varphi_1) \sin \sin(\varphi_2) - \sin(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \cos(\lambda_2 - \lambda_1))} \right) + 180, \text{ для ю. ш.}$$

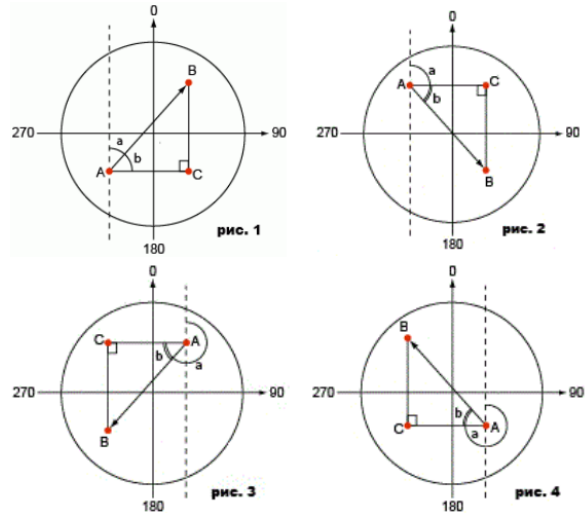


Рис. 4. Расчет углов на сфере

Так как входными данными по ионосферным точкам являются отфильтрованные данные вариаций ПЭС, необходимо соотнести по времени точки МКС и ионосферные точки, попавшие в выбранный квадрат.

Остается осуществить поворот ионосферных точек относительно угла поворота направления движения МКС в соответствующий момент времени

Для поворота точки на координатной плоскости Земли используется следующий алгоритм:

Перевод географических координат в плоскую систему;

Поворот на определенный градус;

Перевод из плоской системы в географическую;

В качестве плоской системы координат можно использовать Меркаторскую систему координат. Равноугольность Меркаторской проекции позволяет просчитать поворот точки без потери по углу, но с потерей по расстоянию.

Рассмотрим простой случай расчета проекции Меркатора для эллипсоида. Для расчета возьмем параметры по ГСК-2011 из ГОСТ 32453—2017.

Долгота — Long (в радианах). Широта — Lat (в радианах)

$$\text{Эксцентриситет} — e = \sqrt{2 * \alpha + \alpha^2}$$

Уравнения перехода из Широты/Долготы в Меркаторскую проекцию:

$$X = a * Long$$

$$Y = a * \ln \ln \left(\tan \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{Lat}{2} \right) * \left(\frac{1 - e * \sin \sin (Lat)}{1 + e * \sin \sin (Lat)} \right)^{e/2} \right)$$

Уравнения перехода из Меркаторской проекции в Широту/Долготу.

$$Long = X/a$$

Широта вычисляется итерационным методом:

$$\varphi_n = \frac{\pi}{2} - 2 * \arctan \arctan \left(\exp \exp \left(-\frac{Y}{a} \right) \right)$$

$$d\varphi = \frac{\pi}{2} - 2 * \arctan \arctan \left(\exp \exp \left(-\frac{Y}{a} \right) * \left(\frac{1 - e * \sin \sin \left(\frac{\pi}{2} \right)}{1 + e * \sin \sin \left(\frac{\pi}{2} \right)} \right) \right) - \varphi_n$$

$$\varphi_{n+1} = \varphi_n + d\varphi$$

Потеря по расстоянию компенсируется путем предварительного расчёта расстояния от

ионосферной точки до станции МКС по формуле гаверсинусов. После поворота точки на плоской системе координат проводится коррекция расстояния.

Следующими этапом проводится фильтрация данных, попавших в определенный квадрат сетки по параметру TECU.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена идея обнаружения ионосферных эффектов от пролета МКС. Реализация этой идеи позволит обнаружить ионосферные эффекты даже в том случае, если их амплитуда будет кратно меньше фоновых значений вариаций ПЭС. Реализация данного метода и накопление соответствующей статистики планируется в ближайшее время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Лисаков Ю.В., Лапшинова О.В., Пушкин Н.М. Измерения токов натекания и квазистационарного электрического поля в приповерхностной зоне РС МКС в ионосфере Земли // Космическая техника и технологии. 2021. №. 4. С. 5–21. DOI: 10.33950/spacetech2308-7625-2021-4-5-21

Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Иркутск: Изд-во ИЦ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.