

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ИОНОСФЕРЕ НА НАКЛОННЫХ ТРАССАХ ПО ДАННЫМ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Корыстин А.А.<sup>1</sup>, Мешков А.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> - Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Российская Федерация, [geoaalex2003@mail.ru](mailto:geoaalex2003@mail.ru)

**Аннотация.** Рассматриваются теоретические вопросы использования данных двухчастотных радионавигационных измерений в интересах восстановления значений концентрации электронов на заданных наклонных трассах в ионосфере на основе метода регуляризации Тихонова

Ключевые слова: обратная задача, ионосфера, концентрация электронов, двухчастотные измерения, радионавигация

Одним из практических применений сведений о концентрации электронов в ионосфере является оценивание условий распространения радиосигнала на наклонных трассах между наземным пунктом и заданными объектами в околоземном космическом пространстве [1]. Одним из способов получения информации о содержании электронов на наклонных трассах является трансionoсферное зондирование сигналами спутниковых радионавигационных систем на двух частотах [2], позволяющее получить интегральную характеристику содержания электронов вдоль трассы от приемника до навигационного космического аппарата (НКА). При этом для оценивания условий распространения радиоволн важно знать закон изменения концентрации электронов на заданных трассах распространения, поскольку от этого зависит величина рефракции радиоволн, которая на различных участках пути распространения может быть как положительной, так и отрицательной.

Для восстановления поля концентрации электронов на заданных трассах распространения радиосигнала в ионосфере, предлагается:

- выбрать и адаптировать модель ионосферы к текущим геофизическим условиям по данным двухчастотных измерений времени запаздывания радионавигационного сигнала на трассах его распространения от навигационных космических аппаратов (НКА) до места расположения приемника;
- при адаптации модели варьировать несколькими исходными параметрами (например, уровнем солнечной активности и другими), отражающими влияние различных факторов на значения концентрации электронов;
- при адаптации модели учитывать закономерности пространственного изменения концентрации электронов в ионосфере.

Таким образом, необходимо решить задачу восстановления поля концентрации электронов на заданных трассах распространения радиосигнала в ионосфере в следующей постановке:

- а) известны:
  - спрогнозированные или рассчитанные априорные начальные значения исходных параметров модели ионосферы (индексов солнечной активности и др.);
  - геодезические координаты расположения установленной навигационной аппаратуры потребителя;
  - массив топоцентрических сферических координат расположения НКА, находящихся в зоне видимости в фиксированные моменты времени;
  - массив значений ионосферных задержек радионавигационных сигналов на нескольких трассах приемник-НКА в различные моменты времени;

- топоцентрические сферические координаты расположения заданных объектов в пространстве.

б) требуется найти значения концентрации электронов в ионосфере вдоль трасс распространения радиосигнала между заданным объектом и приемником.

Задача представляет собой обратную задачу, в которой по известным данным измерений интегральных характеристик (полного электронного содержания на наклонных трассах) ионосферы необходимо определить неизвестные ее дифференциальные параметры - значения концентрации электронов вдоль лучей на заданных направлениях.

Задача является некорректно поставленной и предполагает множество решений. Для ее решения предлагается использовать метод регуляризации Тихонова [3] решения некорректно поставленных задач, позволяющий найти приближенное решение за счет привлечения дополнительной информации об ионосфере. В нашем случае этой дополнительной информацией является модель ионосферы, отражающая некоторые пространственно-временные закономерности изменения концентрации электронов.

Предлагается метод, суть которого заключается в составлении и решении системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), описывающих закономерности изменения концентрации электронов вдоль трасс распространения радиосигнала в ионосфере. Решение СЛАУ ищется в виде вектора параметров модели ионосферы, который обеспечит бы минимум невязки модельного описания полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы на трассах приемник-НКА. Отличием от предложенных ранее методов [4] является адаптация модели ионосферы к текущим условиям по нескольким параметрам.

Как показывает практика, в зоне видимости, ограниченной верхней полусферой, находится порядка 9-10 НКА ГЛОНАСС/GPS. Измерения ПЭС на разных трассах приемник-НКА позволяют построить СЛАУ, решение которой обеспечивает восстановление поля концентрации электронов в ионосфере и оценивание условий распространения радиосигнала на заданных наклонных трассах.

### Литература

1. Девяткин А.М., Корыстин А.А., Краснов В.М., Кулешов Ю.В. Учет влияния атмосферы на работу РЛС путем использования оперативной геофизической информации. // Радиопромышленность, 2014. № 1. С. 89-112.
2. Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СОРАМН, 2006. 480 с.
3. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 283 с.
4. Кулешов Ю.В., Краснов В.М., Корыстин А.А., Мешков А.Н., Бережная К.С. Определение ионосферного индекса солнечной активности на основе измерений градиентов полного электронного содержания и модели IRI-2012. // Известия высших учебных заведений. Физика, 2016. Т. 59, № 12-2. С. 66-70.

## RECOVERY OF THE ELECTRON CONCENTRATION FIELD IN THE IONOSPHERE ON OBLIQUE PATHS ACCORDING TO RADIO NAVIGATION MEASUREMENT DATA

Korystin A.A.<sup>1</sup>, Meshkov A.N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> - *Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia, geoalex2003@mail.ru*

**Abstract.** Theoretical issues of using data of two-frequency radio navigation measurements in the interest of recovering electron concentration values on given inclined paths in the ionosphere are considered on the basis of Tikhonov's regularization method

Key words: inverse problem, ionosphere, electron concentration, dual-frequency measurements, radio navigation