

Сравнение критических частот в регионе Северной Америки по данным ионозондов и высокоорбитальной радиотомографии

Ю.С. Туманова, И.А. Нестеров

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Физический факультет,
119991, Москва, Ленинские Горы,
e-mail: 88julia88@mail.ru*

В работе приведены итоги сравнения критических частот слоя F2, вычисленных из вертикальных профилей электронной концентрации, полученных при высокоорбитальной радиотомографической реконструкции, и критических частот, измеренных ионосферными станциями. Сравнение проведено для региона Северной Америки, рассмотрены два периода: период слабых возмущений в ионосфере и период геомагнитной бури.

Ключевые слова: ионосфера, критическая частота, высокоорбитальная радиотомография.

Введение

В настоящее время идет активное развитие методов высокоорбитальной радиотомографии (ВОРТ), поскольку с созданием сети приемников спутниковых сигналов высокоорбитальных навигационных систем GNSS (Global Navigational Satellite System) появилась возможность использовать непрерывные измерения параметров радиосигналов, проходящих через ионосферу. Методы ВОРТ позволяют получать четырехмерные (пространственно-временные) распределения электронной концентрации. Например, в (Андреева и др., 2005, 2007; Kunitsyn, Nesterov, 2011) разработаны методы ВОРТ, основанные на фазоразностном подходе для решения проблемы неопределенности начальной фазы принимаемых навигационных сигналов. Сравнения результатов ВОРТ с данными ионозондов подтверждают работоспособность данных методов. В данной работе представлены результаты сравнения критических частот, вычисленных из вертикальных профилей электронной концентрации, полученных при радиотомографической реконструкции, и критических частот F2-слоя по данным ионозондов в регионе Северной Америки. Выбор данного региона обусловлен тем, что в данной области расположено достаточное для получения реконструкции распределения электронной концентрации количество станций-приемников GPS. Сравнение проводилось в период 23 октября – 1 ноября 2003 г., охватывающий геомагнитную бурю (29 октября – 1 ноября 2003 г.), и в период слабых возмущений в ионосфере (18–20 сентября 2010 г.).

Полученные результаты

В конце октября 2003 г. произошла сильнейшая геомагнитная буря. 29 и 30 октября Кр-индекс достигал значения 9, многие ионозонды работали нестабильно. Результаты ВОРТ были сопоставлены с данными 11 ионозондов в период 23 октября – 1 ноября 2003 г. Поскольку периодичность измерений ионозонда, как правило, 15 мин, сопоставление проводилось примерно по 7500 точек. На рис. 1 приведены графики зависимости от времени (UT) критических частот f_0F_2 , полученных из результатов радиотомографической реконструкции (сплошные линии) и измеренных тремя wybranными для примера ионозондами (точки): King Salmon (58,4° с.ш., 156,4° з.д.) 29 октября 2003 г., Wallops Is (37,8° с.ш., 75,5° з.д.) 30 октября 2003 г., Eglin AFB (30,4° с.ш., 86,7° з.д.) 31 октября 2003 г. В целом, наблюдается хорошее согласие результатов ВОРТ с данными ионозондов.

Коэффициенты корреляции при этом лежат в пределах 0,85...0,96. Следует отметить, что данные многих ионозондов фрагментарны, как, например, измерения King Salmon (29.10) и Wallops Is (30.10). Среднеквадратичное отклонение (СКО) разницы f_0F_2 , измеренных ионозондами, и f_0F_2 , вычисленных из ВОРТ-реконструкций, в данный период, в среднем, составляет 1,9 МГц.

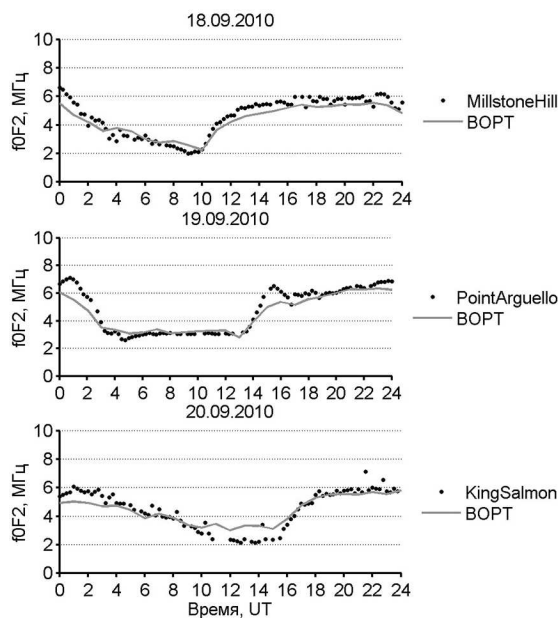


Рис. 1. Сопоставление значений f_0F_2 , вычисленных по радиотомографическим реконструкциям, с данными ионозондов King Salmon (29 октября 2003 г.), Wallops Is (30 октября 2003 г.), Eglin AFB (31 октября 2003 г.)

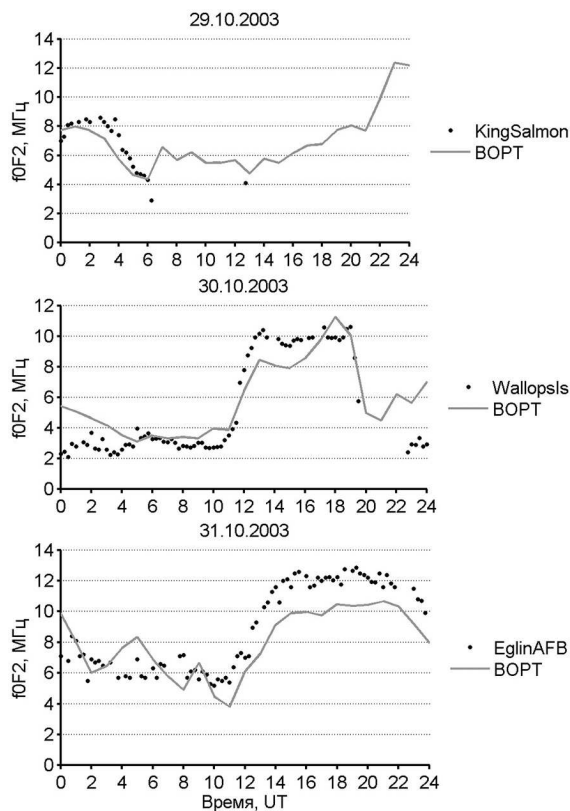


Рис. 2. Сопоставление значений f_0F_2 , вычисленных по радиотомографическим реконструкциям, с данными ионозондов Millstone Hill (18 сентября 2010 г.), Point Arguello (19 сентября 2010 г.), King Salmon (20 сентября 2010 г.)

Для периода 18–20 сентября 2010 г. было проведено сравнение результатов ВОРТ-реконструкций с измерениями 9 ионозондов, таким образом, сопоставление проводилось примерно по 2500 точкам. На рис. 2 приведены типичные графики зависимости от времени (UT) критических частот слоя F2, вычисленных из результатов радиотомографических реконструкций и измеренных тремя wybranными для примера ионосферными станциями: Millstone Hill (42,6° с.ш., 71,5° з.д.) 18 сентября 2010 г., Point Arguello (34,8° с.ш., 120,5° з.д.) 19 сентября 2010 г., King Salmon (58,4° с.ш., 156,4° з.д.) 20 сентября 2010 г.

На рис. 2 хорошо видно, что в слабозвозмущенной ионосфере ($Kp < 3$) наблюдается хорошее согласие результатов ВОРТ-реконструкций с данными ионозондов, разница f_0F_2 при этом, как правило, не превышает 1 МГц, а коэффициенты корреляции 0,88...0,98. СКО разницы критических частот между измерениями ионосферных станций и рассчитанных из вертикальных профилей электронной концентрации, полученных при реконструкции, составляет 0,6 МГц.

Таким образом, на основе проведенного сравнения критических частот слоя F2, измеренных ионосферными станциями и полученных из результатов высокоорбитальной радиотомографической реконструкции, можно сделать вывод о том, что между ними наблюдается хорошее согласие (коэффициент корреляции, в среднем, порядка 0,9) как в слабозвозмущенной ионосфере, так и в период геомагнитной бури. Хотя при наличии сильных возмущений в ионосфере согласие уменьшается. Происходит это по причине перестройки ионосферы: в области D резко возрастает электронная концентрация, вследствие чего увеличивается поглощение радиоволн и на многих ионограммах отсутствуют следы отраженных сигналов, поэтому данные многих ионозондов фрагментарны. Высокоорбитальная радиотомография из-за высокой частоты зондирования позволяет исследовать структуры ионосферы как в спокойные периоды, так и в периоды геомагнитных возмущений. В целом, результаты высокоорбитальной радиотомографии в регионах с достаточно плотной сетью GNSS-приемников хорошо соответствуют данным монозондов.

Работа была выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 10-05-01126, 11-05-01157, 12-05-01000) и гранта Президента РФ (проект МК-2544.2012.5).

Литература

1. Андреева Е.С., Кожарин М.А., Куницын В.Е., Нестеров И.А. Радиотомография ионосферы с применением высокоорбитальных навигационных систем // Вестник МГУ. Сер. физ. 2005. № 1. С. 74–84.
2. Андреева Е.С., Куницын В.Е., Терещенко Е.Д. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007.
3. Kunitsyn V.E., Nesterov I.A. GNSS radio tomography of the ionosphere: the problem with essentially incomplete data // J. Advances in Space Research. 2011. V. 47. N. 10. P. 1789.

Comparison of critical frequencies based on ionosondes data and high-orbital radiotomography data in North America region

Yu.S. Tumanova, I.A. Nesterov

*M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics,
119991, Moscow, Leninskie Gory,
e-mail: 88julia88@mail.ru*

In this article the results of F2-layer critical frequency comparison of high-orbital radio tomographic reconstruction with ionosondes data are presented. This comparison was carried out for the region of North America, two periods were investigated: the period of weak ionospheric disturbances and the period of strong geomagnetic storm.

Keywords: ionosphere, critical frequency, high-orbital radiotomography.