
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 621.396.6

М.А. Бутримов¹

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕКАМЕТРОВЫХ ВОЛН С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА РАДИОТОМОГРАФИИ И МОДЕЛИ IRI

М.А. Butrimov

RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF SHORTWAVE RADIO WAVE PROPAGATION WITH RADIO TOMOGRAPHY METHOD AND WITH IRI MODEL

Ионосфера – неоднородная среда, верхняя часть атмосферы Земли, состоящая из нескольких слоев. Своим названием эта область атмосферы, простирающаяся на высотах от 60 до более чем 600 километров, обязана солнечной радиации и её ионизирующим свойствам. Ионосфера состоит из взвеси нейтральных газов и положительно и отрицательно заряженных частиц (электронов и ионов), при этом существенная степень ионизации достигается уже при высотах порядка 60 километров.

Ионосфера оказывает существенное влияние на распространение декаметровых (коротких) волн. В отсутствие ионосферы короткие волны распространялись бы прямолинейно, однако огромное количество свободных электронов играет решающую роль в распространении декаметровых волн.

Механизм распространения радиоволн в ионосфере весьма сложен. Под действием радиоволн в ионосфере возникают как вынужденные колебания электронов и ионов, так и различные виды коллективных собственных колебаний.

Ионосфера состоит из нескольких слоев, при этом наиболее интересные перепады электронной концентрации отмечаются на высотах от 90 до 400 км. На высотах от 60 до 90 километров

располагается слой D – так называемый слой низкой электронной концентрации, его еще называют областью слабой ионизации. Верхний слой ионосферы (слой F) – слой с наиболее высокой степенью ионизации. Он играет основную роль в процессе отражения радиоволн. Слой F имеет сложную внутреннюю структуру, зависящую от многих факторов – летом он распадается на два слоя F1 и F2, первый занимает высоты от 200 до 250 км, а второй плавают на высотах от 300 и до 400 километров и выше. Ночью слой F1 исчезает, а слой F2 остается, существенно теряя в ионизации. Ниже слоя F, между слоем F и D находится слой E, ионизируемый мягким рентгеновским излучением Солнца. Степень его ионизации ниже, чем у слоя F, и ночью резко уменьшается, однако он продолжает играть существенную роль для сигналов определенных частот. В слое E могут возникать прослойки (облака) с сильной ионизацией (количество свободных электронов в них высоко). Площадь этих облаков может достигать сотен километров, и под действием ветра они могут дрейфовать со скоростью до 250 км/час. Такие облака практически всегда присутствуют в экваториальных районах, а в ночное время суток могут возникать и в более высоких широтах.

Для того чтобы иметь возможность максимально точно моделировать распростране-

¹ Аспирант НОУ ВПО «Российский новый университет».

© Бутримов М.А., 2014.

ние сигналов в ионосфере Земли, необходимо иметь как можно более точные данные о составе ионосферы на всем пути следования сигнала. Это не должны быть какие-то абстрактные данные о распределении электронной концентрации. Это, учитывая изменчивый характер ионосферы, должны быть точные данные для заданного места, даты и времени суток. Существуют два принципиальных источника данных – экспериментальные методы и модели.

К экспериментальным методам относят следующие методы.

Метод вертикального зондирования

Ионозонд, представляющий собой приемник и передатчик, располагается на поверхности Земли. Передатчик посылает короткие импульсы с частотой от 1 до 20 МГц, приемник регистрирует время, за которое волна дойдет до отразившего ее слоя и вернется обратно. Однако такой метод позволяет получить информацию о состоянии ионосферы только над ионозондом. Существует модификация с разнесенными приемником и передатчиком. Но и в таком случае наблюдаемая область не может быть бесконечной или хотя бы достаточно большой.

Метод некогерентного рассеяния

Этот метод является весьма информативным в исследовании ионосферы. Он позволяет точно выявлять неоднородности в распределении полей электронной концентрации, однако требует дорогостоящих и громоздких приемопередающих устройств, обладающих огромной мощностью и не способных обеспечить непрерывные наблюдения. Примером подобных станций могут служить комплексы СУРА и HAARP.

Радиотомография ионосферы

Информация о структуре ионосферы получается по данным наземного и спутникового приема сигналов высоко- и низкоорбитальных спутников наземными станциями приема и обработки сигналов [3].

Существуют также прогностические модели ионосферы: теоретические, эмпирические и полуэмпирические. Теоретические модели требуют больших вычислительных затрат (как по ресурсам, так и по времени расчета), поэтому малопригодны для реализации в автоматической системе прогнозирования. От этого недостатка не свободны и полуэмпирические модели, хотя они сочетают в себе достоинства теоретических и эмпирических моделей. Поэтому в последнее время в прогнозировании большое распространение получили эмпирические модели ионосферы.

Наиболее распространенным является проект IRI (International Reference Ionosphere) –

международный справочник ионосферы. Спонсируемый крупнейшими исследовательскими центрами, этот справочник представляет собой эмпирическую модель ионосферы, построенную на основе данных из таких источников, как международная сеть специальных ионозондов для изучения ионосферы, мощных радаров некогерентного рассеяния, спутников, предназначенных для изучения ионосферы, и многих других.

Для того чтобы можно было говорить о корректности данных, получаемых с помощью модели IRI, необходимо произвести сопоставление результатов расчетов методом бихарактеристик на основе данных, полученных с помощью эксперимента (в данном случае – с помощью метода радиотомографии) с результатами расчетов на основе данных, полученных из эмпирической модели IRI [12].

В качестве исследуемой области возьмем область экваториальной аномалии вдоль 121 меридиана [5]. Для наилучшей демонстрации поведения радиоволн в ионосфере постараемся подобрать как можно более показательные условия для частоты сигнала и местоположения источника [6].

Первым делом обратимся к данным радиотомографии за 19.10.1994 6:45 утра, полученным между 10.95 и 29.49 параллелями.

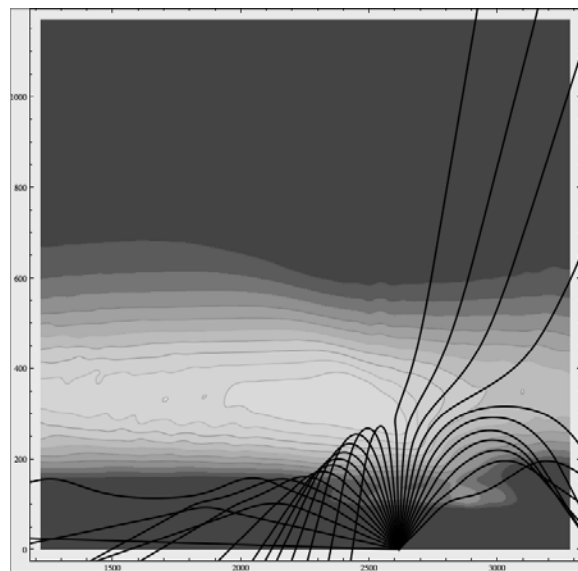


Рис. 1. 11.51 МГц. РТ

На рис. 1 хорошо видно, насколько сложной структурой оказывается ионосфера в зоне экваториальной аномалии. Существует выраженное пятно с облаком локального максимума электронов, однако вокруг него простираются области, в которых также присутствуют вкрапления элек-

тронных облаков. В нижних слоях ионосферы, на высотах менее 200 метров, также существуют области локальных максимумов. Все многообразие сложных форм распределения полей электронов делает трассы радиоволн причудливыми и сложными. Хорошо видно, что часть волн будет отражена от поверхности Земли, однако в зависимости от угла места часть волн будет отражена обратно на поверхность одним или двумя скачками. Вместе с этим возникают также каналы внутриионосферного распространения, когда волна начинает отражаться от различных слоев внутри ионосферы.

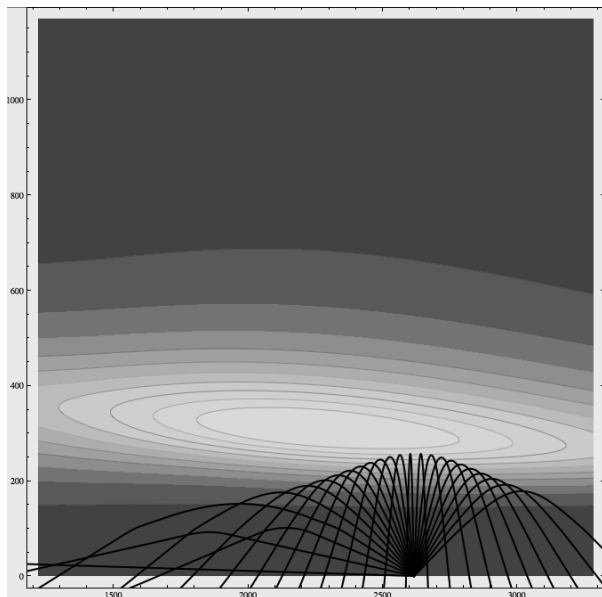


Рис. 2. 11.51 МГц. IRI

Расположив источник с точно такими же характеристиками и используя данные из модели IRI, получаем отличную от экспериментальных данных картину (рис. 2). Не возникает внутриионосферного распространения, все волны отражаются обратно на поверхность Земли. Корреляция с экспериментальными данными практически отсутствует.

Рассмотрим другую наблюдаемую область – между 8 и 30 параллелями. Для того чтобы получить как можно более интересную картину распространения радиоволн, заставим наш источник излучать волны узким пучком прямо в зону с ярко выраженной ионосферной аномалией. Хорошо виден один возникший канал внутриионосферного распространения, также видно сложное отражение прямо в центре аномалии от области с высокой концентрацией электронов и односкачковое отражение от различных слоев в зависимости от различных углов места (рис. 3). Теперь посмотрим на данные из модели.

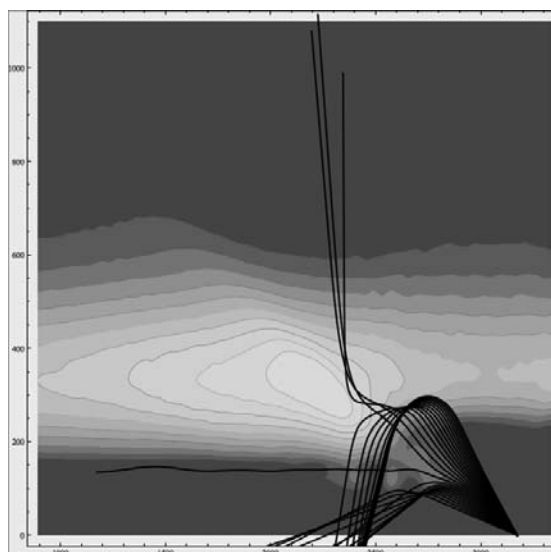


Рис. 3. 11.31 МГц. PT

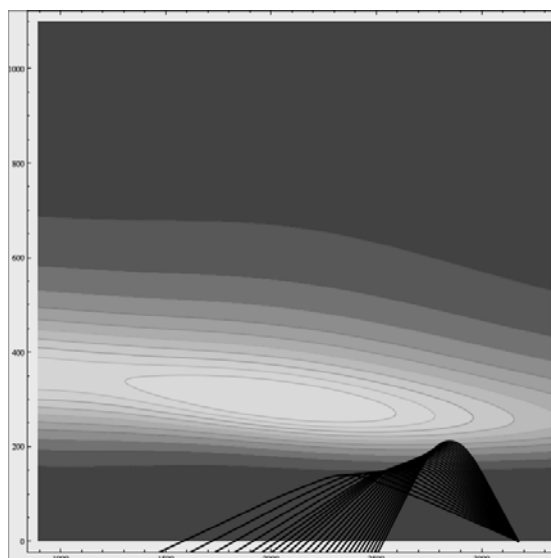


Рис. 4. 11.31 МГц. IRI

На рис. 4 хорошо видно, как исчезают все нюансы аномалии в модели IRI. Общий характер распределения уровней электронной концентрации по высотам примерно соответствует экспериментальным данным, однако говорить о том, что при граничных условиях модель даст возможность точного расчета трассы, вдоль которой будет распространяться сигнал, уже не приходится.

Исследуем ту же область, но в другое время. Также будет полезно рассмотреть различия не только между характером распространения волн, но и между характером распределения электронов на одних и тех же координатах, но в разное время.

Из рис. 5.1 и 5.2 видно не только, как меняется характер распространения волн с изменением частоты всего лишь на 0.2 МГц, но и то, как различается характер распределения полей электронов в ионосфере в зависимости от дня и времени суток. С одной стороны картины распределения электронов очень похожи, с другой стороны хорошо видно, как изменяются формы и протяженности некоторых слоев за время, сопоставимое с одними сутками (около 25,5 часов). В масштабах рисунков видно, что эти изменения незначительны, однако в реальности речь идет о сокращении или увеличении протяженности тех или иных областей на сотни километров.

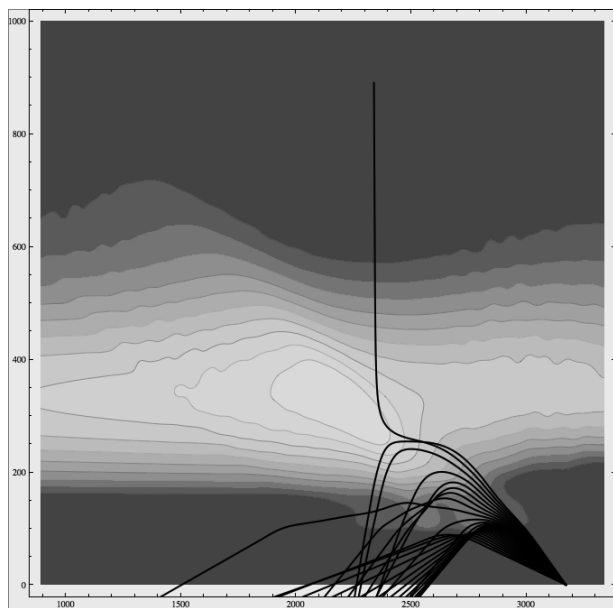


Рис. 5.1. 11.31 МГц. РТ 20 число

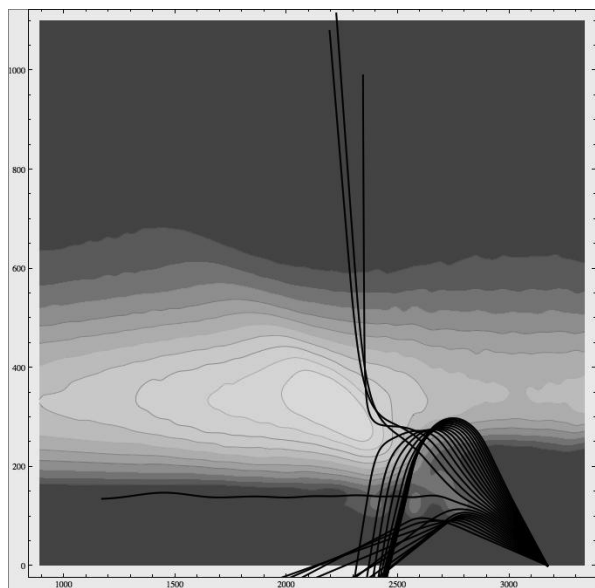


Рис. 5.2. 11.31 МГц. РТ 19 число

Рассмотрим данные из модели IRI.

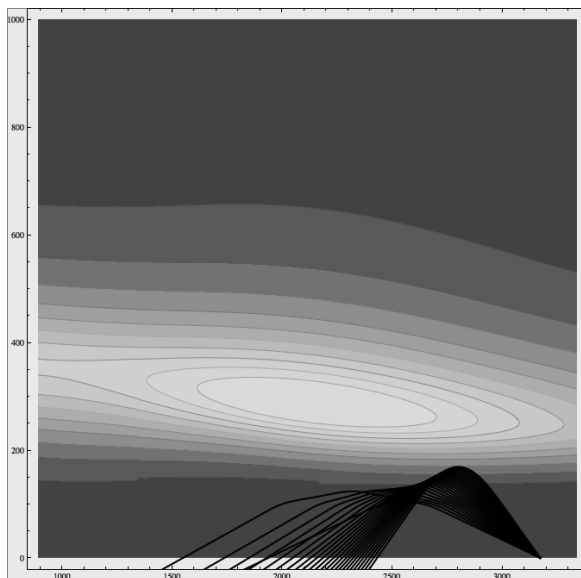


Рис. 6.1. 11.51 МГц. IRI 20 число

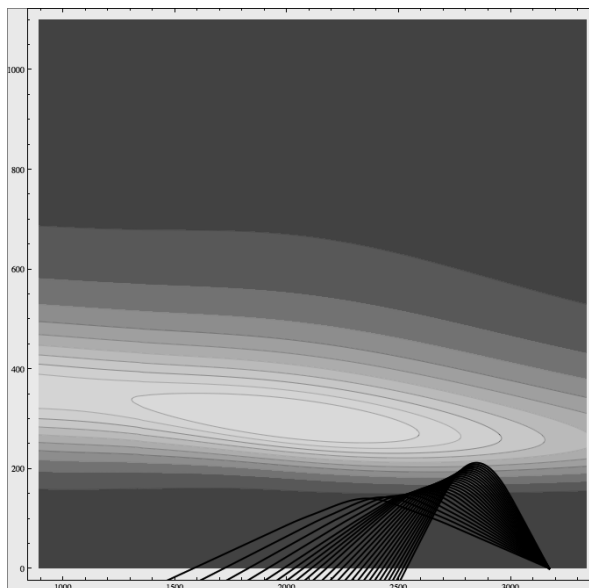


Рис. 6.2. 11.31 МГц. IRI 19 число

На рис. 6.1 и 6.2 также видно изменение электронной концентрации в различных слоях, однако определенно масштаб этих изменений не столь явен, как в случае экспериментальных данных. Хорошо видно, что если частота волны делает ее очень чувствительной к воздействию аномалии (это возникает, когда волна не отражается от первого же слоя и проходит дальше к ядру аномалии), то довольно трудно называть трассы, полученные с помощью IRI, достаточно точными для использования их наравне с трассами, полученными с помощью экспериментальных данных.

Заключение

Данные о состоянии ионосферы, полученные в результате экспериментов, чрезвычайно хороши для проведения различных математических расчетов, однако у них есть один существенный недостаток. Получение экспериментальных данных – это дорогостоящий процесс, к тому же его практически невозможно организовать непрерывным для больших областей. В то же время, принимая в расчет неточности модели IRI в аномальных зонах, ее можно использовать для неограниченных условий. В действительности модель IRI представляет довольно верные данные о распределении электронов по слоям ионосферы над заданной областью, однако практически не предоставляет данных о каких-либо существующих локальных аномалиях и возмущениях.

Литература

1. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягев Д.В. Исследование особенностей распространения коротких радиоволн в неоднородной анизотропной ионосфере // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2009. – Т. 14. – № 8. – С. 17–26.
2. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягев Д.В. Математическое моделирование распространения радиоволн в анизотропной неоднородной ионосфере // *Вестник Российского нового университета*. – Серия «Управление, вычислительная техника и информатика». – М. : РосНОУ. – 2009. – Вып. 2. – С. 7–14.
3. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягев Д.В. Моделирование лучевой и каустической структуры электромагнитных полей по данным радиотомографии ионосферы в окрестности экваториальной аномалии // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2010. – Т. 15. – № 8. – С. 5–11.
4. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягев Д.В. Исследование влияния локальных неоднородностей ионосферной плазмы на распространение коротких радиоволн // *Вестник Российского нового университета*. – Серия «Управление, вычислительная техника и информатика». – М. : РосНОУ. – 2010. – Вып. 3. – С. 17–25.
5. Крюковский А.С., Кирьянова К.С. Особенности лучевого распространения радиоволн в окрестности экваториальной аномалии // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2011. – № 8. – С. 21–24.
6. Крюковский А.С. Особенности каустической и лучевой структур отражённых волн в линейном плазменном слое // *Радиотехника и электроника*. – 2012. – Т. 7. – № 3. – С. 271–280.
7. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Кирьянова К.С. Метод расширенной бихарактеристической системы при моделировании распространения радиоволн в ионосферной плазме // *Радиотехника и электроника*. – М. : Наука. – 2012. – Т. 57. – № 9. – С. 1028–1034.
8. Kiryanova K.S., Kryukovsky A.S., Lukin D.S. Simulation of decametric wave propagation in the ionospheric plasma // *Revista de Matematica. Teoria y Aplicaciones*. – 2013. – V. 20. – № 1. – P. 21–34.
9. Bilitza D., McKinnell L.-A., Reinisch B., and Fuller-Rowell T. The International Reference Ionosphere (IRI) today and in the future // *Geodesy*, 85:909–920, DOI 10.1007/s00190-010-0427-x, 2011.
10. Bilitza D., Steven A Brown, Matthew Y. Wang, Jonas R. Souza, and Patrick A Roddy, Measurements and IRI Model Predictions during the Recent Solar Minimum // *Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 86, 99-106, doi:10.1016/j.jastp.2012.06.010, 2012.
11. IRI – International Reference Ionosphere. – D. Bilitza NASA/GSFC, Heliospheric Physics Lab., Code 672, Greenbelt, Maryland 20771 and Space Weather Lab., George Mason University, Fairfax, Virginia <http://iri.gsfc.nasa.gov/>
12. Бутримов М.А., Крюковский А.С., Лукин Д.С. Сопоставление результатов численного моделирования распространения радиоволн на основе модели ионосферы Земли, основанной на данных радиотомографии, и модели IRI // *Вестник Российского нового университета*. – Серия «Управление, вычислительная техника и информатика». – 2013. – Вып. 4. – С. 7.