

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ



УДК 621.396.6

М.А. Бутримов¹
А.С. Крюковский²
Д.С. Лукин³

M.A. Butrimov
A.S. Kryukovsky
D.S. Lukin

**СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ
ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ
ЗЕМЛИ, ОСНОВАННОЙ НА ДАННЫХ
РАДИОТОМОГРАФИИ, И МОДЕЛИ IRI**

**COMPARISON OF RESULTS OF
NUMERICAL MODELING OF RADIO-
WAVE PROPAGATION ON THE BASIS OF
IONOSPHERE MODEL OF THE EARTH
BASED ON THE RADIO-TOMOGRAPHY
DATA, AND MODEL IRI**

Выполнено сопоставление результатов численного моделирования распространения радиоволн в ионосфере Земли на основе данных о распределении электронной концентрации, полученных с помощью модели IRI и метода радиотомографии. Показано, что на основе модели IRI не всегда возможно построение достоверных прогнозов радиосвязи, и необходима корректировка моделей экспериментальными данными, для получения которых является метод радиотомографии.

Ключевые слова: ионосфера, распространение радиоволн, радиотомография, модель IRI, системы характеристик, прогнозы, экваториальная аномалия.

The comparison of results of numerical modeling of radio-wave propagation in the Earth's ionosphere is executed on the basis of the data about distribution of electronic concentration model, received with the IRI help, and the radiotomography method. It is shown, that on the basis of model IRI the construction of the authentic forecasts of radio communication is not always possible, and the updating of models by experimental data is necessary, most perspective of which is the radiotomography method.

Keywords: ionosphere, radio wave propagation, radiotomography, model IRI, systems of bi-characteristics forecasts, equatorial anomaly.

Распространение радиоволн в ионосфере является одним из важнейших разделов общей научной проблемы распространения электромагнитных волн. В 20-х годах XX века считалось, что радиоволны короче 200 метров не мо-

¹ Аспирант НОУ ВПО «Российский новый университет».

² Доктор физико-математических наук, профессор, декан факультета ИСиКТ НОУ ВПО «Российский новый университет».

³ Доктор физико-математических наук, профессор, профессор МФТИ.

гут быть использованы для дальней связи из-за чрезмерного поглощения. Однако первые эксперименты по дальнему приему коротких волн между Европой и Америкой показали, что где-то вокруг Земли существует ионизированный слой атмосферы, способный отражать радиоволны. Его назвали ионосферой. Радиоволны, излучаемые с поверхности Земли, распространяются прямолинейно, как и все другие виды электромагнитных колебаний, однако следует учесть, что в данном случае поверхность Земли и ионизированные слои атмосферы играют роль обла-

док огромного волновода, воздействуя на радиоволны подобно зеркалам, отражающим на свет. Отражение от ионизированных слоев атмосферы вместе с попеременным отражением от поверхности Земли или воды позволяет радиоволнам преодолевать тысячи километров, огибая земной шар. Возможно также рикошетирующее распространение, когда волна огибает земной шар, не касаясь поверхности Земли за счет переотражений от ионосферного слоя [1].

Ионосфера в основном состоит из отрицательно заряженных свободных электронов и положительно заряженных ионов. Ионы и электроны образуются в результате диссоциации молекул и ионизации нейтральных атомов газа солнечным ультрафиолетовым и рентгеновским излучением. Для того чтобы ионизовать атом, необходимо сообщить ему энергию ионизации, основным источником которой для ионосферы является ультрафиолетовое, рентгеновское и корпускулярное излучение Солнца. Под действием солнечного излучения в ионосфере непрерывно образуются все новые и новые электроны, однако с заходом Солнца, в отсутствие ионизирующего излучения, образование свободных электронов прекращается, и их концентрация начинает снижаться. Чем больше число свободных электронов в ионосфере, тем лучше от нее отражаются радиоволны, и, наоборот, со снижением электронной концентрации становится возможным дальнейшее распространение радиоволн только низкочастотного диапазона.

Значительный объем наблюдений за ионосферой, проводимых на земном шаре в течение нескольких десятилетий, дал большой фактический материал. Изучение этого материала позволило вскрыть ряд закономерностей изменения состояния ионосферы. Используя эти закономерности, можно предсказывать состояние ионосферы на большие сроки вперед, то есть составлять долгосрочные радиопрогнозы. Непрерывно продолжающиеся наблюдения за ионосферой дают возможность все большего уточнения знаний в этой области и повышения надежности радиопрогнозов.

Известны различные прогностические модели ионосферы: теоретические, эмпирические и полуэмпирические. Теоретические модели требуют больших вычислительных затрат (как по ресурсам, так и по времени расчета), поэтому мало пригодны 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 вре-

мя в прогнозировании большое распространение получили эмпирические модели ионосферы.

Наиболее распространенным является проект IRI (International Reference Ionosphere) – международный справочник ионосферы [2–4]. 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. Данные в модели IRI обновляются ежегодно. IRI позволяет пакетно выгружать большие объемы информации в удобном виде, что позволяет использовать их для проведения вычислений в различном стороннем программном обеспечении. Сама модель IRI написана на языке фортран и распространяется свободно вместе с исходными кодами и справочниками.

Механизм распространения радиоволн в ионосфере (многокомпонентной плазме) весьма сложен. Под действием радиоволн в ионосфере возникают как вынужденные колебания электронов и ионов, так и различные виды коллективных собственных колебаний. В зависимости от частоты радиоволны, основную роль играет то один, то другой вид колебаний, что объясняет различные свойства ионосферы для различных диапазонов волн. Например, при высокой частоте в распространении радиоволн принимают участие только электроны.

Модель IRI позволяет, используя данные о различных характеристиках ионосферы на различных диапазонах высот, вычислить траектории лучей, вдоль которых будут распространяться радиоволны различных диапазонов.

Одной из самых важных характеристик ионосферы, сильнее всего влияющей на распространение радиоволн, является электронная концентрация. Использование данных, полученных с помощью IRI, позволяет моделировать множество важных параметров ионосферы, например таких, как линии одинаковых уровней электронной концентрации. В частности, используя модель IRI и систему компьютерной алгебры Wolfram Mathematica, можно получить данные об электронной концентрации в интересующем нас диапазоне высот и широт и построить визуальную модель распределения уровней электронной концентрации. Далее, основываясь на методе бихарактеристик [5–12], можно построить лучевую, а также амплитудно-фазовую структуру радиоволн.

В силу своей эмпирической природы, модель IRI обладает определенной неточностью. Чтобы проиллюстрировать характер этой неточности, можно провести расчеты, используя входные экспериментальные данные, полученные методом радиотомографии [13–17], и данные, полученные из модели IRI, и сравнить их.

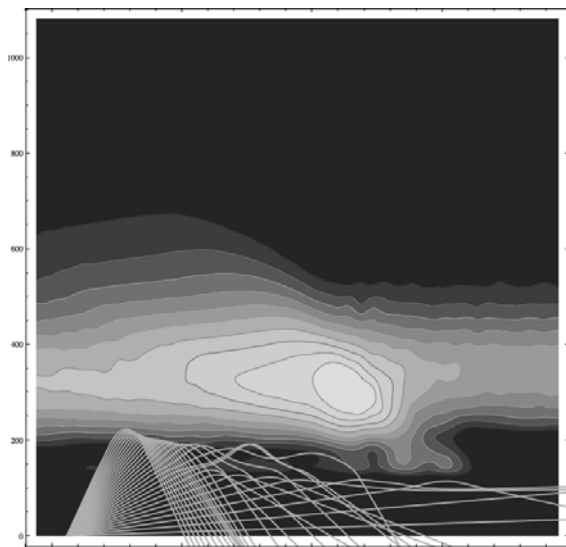


Рис. 1. Экспериментальные данные.
03.09.1994, 6:20 утра

В качестве примера рассмотрим распространение радиоволн в окрестности экваториальной аномалии. Существует так называемая экваториальная аномалия распределения областей высокой и низкой электронной концентрации. Для начала произведем построение лучевой структуры для волны частотой 8,5 МГц на основе экспериментальных данных, полученных 3 сентября 1994 года в 6:20 утра вдоль 121 меридиана.

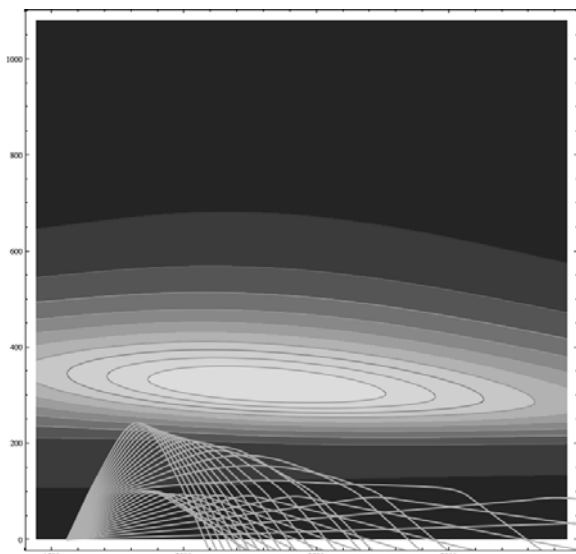


Рис. 2. Данные, полученные из модели IRI.
03.09.1994, 6:20 утра

На рис. 1 хорошо видно, какой сложной формой обладают зоны с различной электронной концентрацией. Их края не сглажены, наблюдаются различные пики и провалы. Структуру трудно назвать симметричной.

Для рис. 2 взяты данные, полученные из модели IRI для тех же самых координат и времени. Структура хорошо сглажена и в ней присутствует симметрия. Из сравнения рис. 1 и 2 хорошо видно, что данные, получаемые из модели IRI, существенно отличаются от данных, полученных методом радиотомографии, модель IRI не всегда точно отображает реально существующую картину. Нижнее каустическое острие, ясно обозначенное на рис. 2, практически не видно на рис. 1, что говорит о существенно разном описании нижней ионосферы этими моделями.

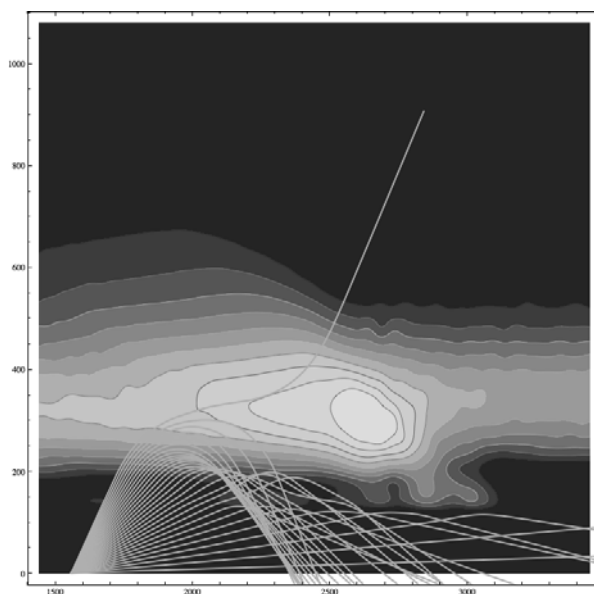


Рис. 3. 12,5 МГц, экспериментальные данные

Тем не менее, модель IRI может применяться для построения лучевой структуры радиоволн в тех случаях, когда не важна абсолютная точность. В данных, получаемых из модели, отражены физические процессы, происходящие в ионосфере, в том числе изменение областей различной электронной концентрации с течением дня. Для того чтобы более полно сопоставить модели, произведем несколько расчетов.

Для этого, используя данные, полученные методом радиотомографии, и данные, полученные из модели IRI, построим лучевые структуры волн с различной частотой и сравним их.

На рис. 3 и 4 сопоставлены результаты расчетов лучевых траекторий для волн с частотой в 12,5 МГц. Картина распространения волн существенно различается для данных радиотомографии и для модели IRI. Данные радиотомографии

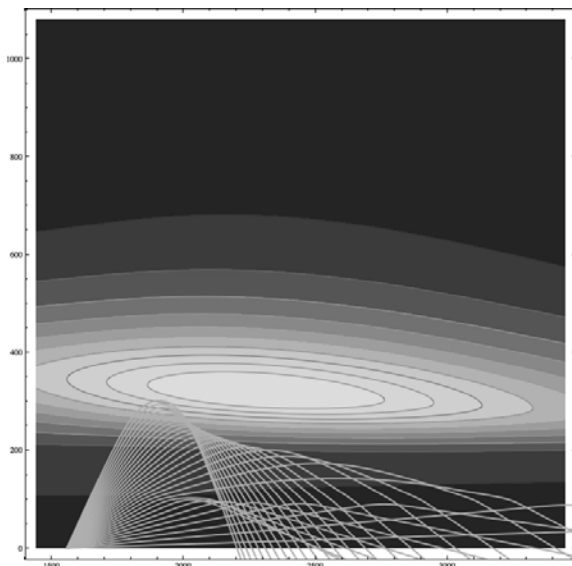


Рис. 4. 12,5 МГц, данные из модели IRI

предсказывают границу мертвой зоны на расстоянии 820 км, а модель IRI – на расстоянии 550 км от источника излучения.

В лучевой структуре, построенной на основе модели IRI (рис. 4), присутствует регулярность, напротив, для модели радиотомографии (рис. 3) характерно перемешивание лучевых траекторий. Волны более низкой частоты практически полностью отражаются от нижних слоев ионосферы, в то время как волны более высокой частоты как правило или покидают ионосферу, или отражаются в ее средних и нижних слоях. Иногда может возникать эффект распространения волны без скачков, за счет переотражений между слоями внутри ионосферы.

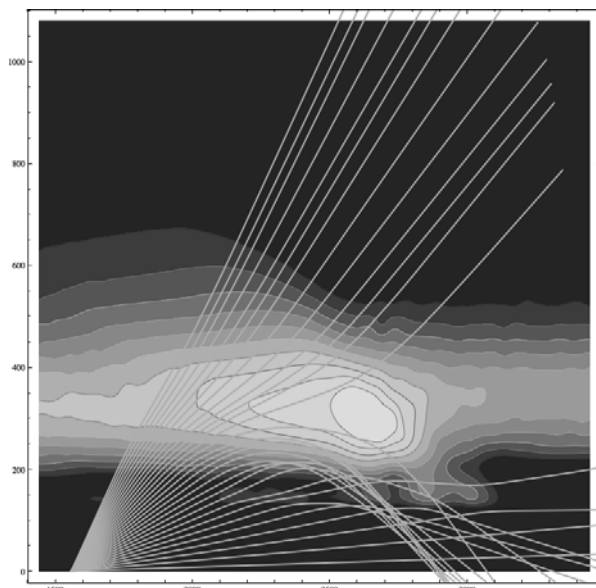


Рис. 5. 20 МГц, экспериментальные данные

Увеличим частоту волны до 20 МГц и выполним расчеты лучевой структуры.

Видно (рис. 5), что часть волн, вошедших под более острым углом, покинула ионосферу без отражений, однако с уменьшением угла вхождения начинают возникать эффекты отражений и даже переотражений внутри ионосферы. Также имеет место сильное перемешивание волн, выпущенных под разными углами, за счет неравномерного распределения электронов в средне-нижних слоях. На рис. 6, построенном на данных модели IRI, подобной картины не наблюдается.

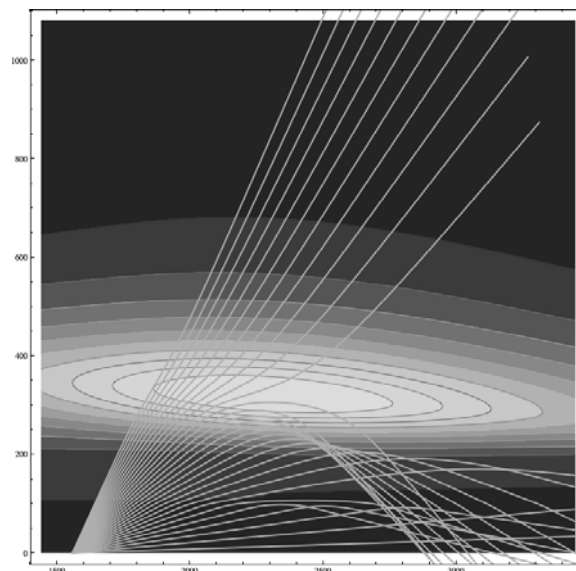


Рис. 6. 20 МГц, данные из модели IRI

Часть волн точно так же покинула ионосферу без переотражений, но из-за сильного упрощения и недостаточной детализации данных о средних слоях ионосферы сложный характер отражений сигнала сглаживается, эффекты внутренних переотражений исчезают, бескачкового распространения волн не наблюдается.

Подобные ситуации создают некоторые ограничения в использовании эмпирических моделей для проведения расчетов, однако следует учитывать, что в случаях, когда дело не касается аномальных областей, или в случаях, когда нет необходимых данных, добытых экспериментально, данные, получаемые из эмпирических моделей, вполне пригодны для работы.

Заключение

Механизм распространения коротковолновых сигналов предполагает их отражение от различных слоев ионосферы. Однако характер этого отражения определяется такой непостоянной характеристикой, как электронная концентрация. На электронную концентрацию оказывает

влияние множество факторов, например таких, как время суток или солнечная активность. Использование различных моделей ионосферы позволяет предсказывать характер распространения радиоволн, и чем точнее и полнее будет используемая модель, тем точнее будут данные о распространении электромагнитных волн. Однако для построения достоверных прогнозов радиосвязи необходима корректировка моделей экспериментальными данными, и наиболее перспективным из них является метод радиотомографии.

Литература

1. Казанцев А.Н., Лукин Д.С. Механизм распространения радиоволн, излучаемых искусственными спутниками Земли // Космические исследования. – 1966. – Т. 4. – № 2. – С. 221–237.
2. Bilitza D., McKinnell L.-A., Reinisch B., Fuller-Rowell T. The International Reference Ionosphere (IRI) today and in the future // J. Geodesy, 85:909-920, DOI 10.1007/s00190-010-0427-x, 2011.
3. Bilitza D., Brown Steven A., Wang Matthew Y., Souza Jonas R., Roddy Patrick A., Measurements and IRI Model Predictions during the Recent Solar Minimum // J. Atmos. Solar-Terr. Phys., V. 86. P. 99–106, doi:10.1016/j.jastp.2012.06.010, 2012.
4. Bilitza D. IRI – International Reference Ionosphere // NASA/GSFC, Heliospheric Physics Lab., Code 672, Greenbelt, Maryland 20771 and Space Weather Lab., George Mason University, Fairfax, Virginia – <http://iri.gsfc.nasa.gov/>
5. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В. Исследование особенностей распространения коротких радиоволн в неоднородной анизотропной ионосфере // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2009. – Т. 14. – № 8. – С. 17–26.
6. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев 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.
7. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев 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.
8. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев 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.
9. Крюковский А.С., Кирьянова К.С. Особенности лучевого распространения радиоволн в окрестности экваториальной аномалии // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2011. – № 8. – С. 21–24.
10. Крюковский А.С. Особенности каустической и лучевой структур отраженных волн в линейном плазменном слое // Радиотехника и электроника. – 2012. – Т. 57. – № 3. – С. 271–280.
11. 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.
12. 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.
13. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. – М. : Физматлит, 2007. – 345 с.
14. Andreeva E.S., Franke S.J., Kunitsyn V.E., Yeh K.C. Some features of the Equatorial Anomaly revealed by Ionospheric Tomography, Geophysical Research Letters. – 2000. – Vol. 27. – No 16. – P. 2465–2468.
15. Franke S.J., Yeh K.C., Andreeva E.S., Kunitsyn V.E. A study of the equatorial anomaly ionosphere using tomographic images // Radio Science. – 2003. – V. 38. – No. 1. – P. 1011–1020.
16. Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Franke S.J., Yeh K.C. Tomographic investigations of temporal variations of the ionospheric electron density and the implied fluxes // Geophysical Research Letters. – 2003. – V. 30. – No. 16. – P. 1851–1854.
17. Андреева Е.С., Крюковский А.С., Куницын В.Е., Лукин Д.С., Растягаев Д.В., Кирьянова К.С. Моделирование лучевой и каустической структуры электромагнитных полей по данным радиотомографии ионосферы в окрестности экваториальной аномалии // Распространение радиоволн : сб. докл. XXIII Всероссийской научной конференции (23–26 мая 2011; Йошкар-Ола). – Йошкар-Ола : Марийский государственный технический университет, 2011. – Т. 3. – С. 288–291.