

Расчет величины горизонтального отклонения траектории ионосферного распространения радиосигнала

В статье описано моделирование ионосферного распространения радиосигнала с учетом влияния состояния ионосферы в окрестности точки поворота луча на траекторию распространения. Учет подобного влияния, как предполагается, может улучшить результаты, получаемые при расчете характеристик ионосферных радиолиний, а также, возможно, позволит скорректировать результаты пеленгации ионосферных радиосигналов. В качестве основной характеристики, описывающей данное влияние, выбрана величина отклонения от точки приема в плоскости, перпендикулярной основной плоскости распространения радиосигнала (плоскости, перпендикулярной плоскости большого круга, задаваемого центром Земли и координатами передатчика и приемника). Моделирование производилось с использованием суперкомпьютеров семейства "СКИФ" в рамках научно-технической программы Союзного государства России и Белоруссии "СКИФ-ГРИД".

Кучумов А.А., зав. лаб. МТУСИ, НИО-48
Рябцев В.В., м.н.с., МТУСИ, НИО-48

Введение

При распространении радиоволн высокочастотного (ВЧ) диапазона имеет место так называемая девиация лучей, то есть отклонение направления распространения волны от дуги большого круга, задаваемой координатами передатчика и приемника. Основными причинами девиации лучей являются наклоны отражающих слоев ионосферы в направлении, перпендикулярном трассе, а также боковое рассеяние на ионосферных неоднородностях. В высоких широтах из-за большей неоднородности ионосферы углы девиации лучей более значительны, чем в средних широтах. В данном разделе предлагается методика расчета бокового отклонения траектории, учитывающая поперечную к направлению распространения волны неоднородность ионосферы. Характеристики состояния ионосферы (в частности зависимость концентрации электронов от высоты) рассчитываются с помощью модели IRI-M, разработанной в НИО-48 МТУСИ на основе Международной эталонной модели ионосферы IRI ([1]). Для моделирования ионосферного распространения радиосигнала использовался модифицированный метод Казанцева-Смита (эквивалентного треугольника), описанный в [2].

Все результаты получены в рамках научно-технической программы Союзного государства Российской Федерации и Республики Беларусь "СКИФ-ГРИД".

Алгоритм расчета влияния регулярных неоднородностей ионосферы на боковое отклонение траектории радиоволн ВЧ-диапазона

В статье приводится предельно сжатое описание разработанного алгоритма, что обусловлено ограничениями на размер статьи, поэтому подробно будут описаны лишь некоторые шаги алгоритма.

Исходные данные для расчета

В качестве входных данных для модели берутся выходные данные модели ионосферного распространения радиосигнала, описание которой приведено [2].

В итоге, в качестве исходных данных на вход алгоритма подаются следующие параметры:

- координаты передатчика, географическая широта – lat_1 , град., географическая долгота – lng_1 ,
- оптимальная рабочая частота f_{ob} , МГц,
- оптимальный угол выхода луча α_{ϕ} ,
- азимут на приемник β_r (относительно этой величины будет считаться отклонение траектории),
- дата и время: год, месяц, день, время суток UTC.

Расчеты характеристик распространения провод для обеих магнитоионных компонент с использованием лучевого приближения геометрической оптики. Неоднородная

ионосфера разбивается на сферические элементарные слои малой толщины. Предполагается, что в пределах каждого элементарного слоя значения концентрации электронов изменяются линейно, т.е. градиент концентрации постоянен, коэффициент преломления считается также величиной постоянной и равной среднему значению в элементарном слое, а траектория прямолинейной. В рамках рассматриваемой методики предлагается предварительно сделать расчет параметров траектории луча в продольной плоскости большого круга (определить координаты источника излучения), а затем для полученной траектории провести расчет возможного бокового отклонения.

Из экспериментальных и теоретических исследований вопросов распространения радиоволн ВЧ диапазона через ионосферу Земли известно, что при наклонном падении траектория лежит в плоскости большого круга, проходящей через точки передачи и приема сигнала и центр Земли. Отклонение от плоскости большого круга при углах падения на ионосферный слой $\varphi > 10^\circ$ столь незначительно, что его обычно не учитывают. Поэтому далее рассматривались только односкачковые траектории, в которых этот угол для трасс длиной более 2000 км, как правило, $\varphi < 10^\circ$.

Краткое описание алгоритма

Алгоритм расчета поперечного отклонения траектории луча можно разделить на следующие 12 шагов:

- 1) расчет параметров траектории луча в плоскости большого круга (см. [2]);
- 2) определение углового расстояния $\Delta\beta$ до контрольных точек $K_{1L} \dots K_{mL}, K_{1R} \dots K_{mR}$ (см. ниже определение данных точек) в поперечном направлении и определение координат контрольных точек по формуле (2.1);
- 3) расчет значений электронной плотности в контрольных точках $K_{1L} \dots K_{mL}, K_{1R} \dots K_{mR}$;
- 4) определение расстояний от центра Земли до линии одинаковых значений электронной плотности в контрольных точках $K_{1L} \dots K_{mL}, K_{1R} \dots K_{mR}$;
- 5) расчет углов $\delta_1 \dots \delta_m$ между нормалью к линии одинаковых значений электронной плотности и вертикалью по формуле (2.15) в контрольных точках $M_1 \dots M_m$;
- 6) расчет координат точки $M_1 (x_{M1}, y_{M1}, z_{M1})$ в системе координат $B_0 x_0 y_0 z_0$ по формулам (2.33), присвоение значений координат т. M_1 точке B_1 ;
- 7) расчет координат т. B_1 в системе координат $B_0 x_0 y_0 z_0$ по формулам (2.35), угол $\delta_{B1} = \delta_1 - \delta_{B0-1}$, для точки B_1 $\delta_{B0-1} = 0$;
- 8) расчет координат точке B_1 в системе координат $B_0 x_0 y_0 z_0$ по формулам (2.31-2.33);
- 9) расчет координат точке B_1 в системе координат $B_0 x_0 y_0 z_0$ по формулам (2.28), (2.30), угол азимута определяется из точки B_1 в точку B_0 (из точки B_1 в точку B_{-1}) плюс 180° ;
- 10) расчет координат точки B_1 в глобальной прямоугольной системе координат $Oxyz$ по формулам (2.25), (2.27);

11) расчет величины бокового отклонения δr_1 т. B_1 от плоскости большого круга, проходящей через точку B_0 по формулам (2.21-2.23).

12) расчеты по пунктам 6–11 проводятся последовательно для траекторных точек от B_1 до B_m и P_{2RL} .

Отклонение точки P_{2RL} от плоскости большого круга и будет результирующим поперечным отклонением траектории от позиции приемника.

Результаты моделирования

Моделирование производилось на суперкомпьютере СКИФ МГУ "ЧЕБЫШЕВ" с использованием специального программного обеспечения, адаптированного для работы на многопроцессорных системах.

Примерами полученных результатов являются таблица, полученная при моделировании широтных трасс для различных месяцев и различных широт (низких, средних, высоких) и рисунок, иллюстрирующий возможные отклонения траектории для различных трасс для передатчика, расположенного в Москве. Более детальное описание результатов в рамках данной статьи невозможно по указанной выше причине, поэтому далее кратко опишем выводы, следующие из результатов моделирования.

Максимальное значение отклонения (в градусах) при моделировании для широтных трасс (2010 г.)

Трассы / Месяц	Низкоширотные (от 0 до 20°)	Среднеширотные (от 20 до 40°)	Среднеширотные (от 40 до 60°)	Высокоширотные (от 60 до 80°)
Январь	0,54	0,617	0,764	0,834
Февраль	0,538	0,613	0,778	0,897
Март	0,537	0,607	0,766	0,934
Апрель	0,584	0,604	0,759	0,891
Май	0,575	0,607	0,674	0,837
Июнь	0,537	0,610	0,612	0,749
Июль	0,576	0,604	0,617	0
Август	0,574	0,604	0,680	0
Сентябрь	0,581	0,608	0,728	0,573
Октябрь	0,577	0,610	0,719	0,620
Ноябрь	0,573	0,612	0,747	0,637
Декабрь	0,579	0,614	0,769	0,647

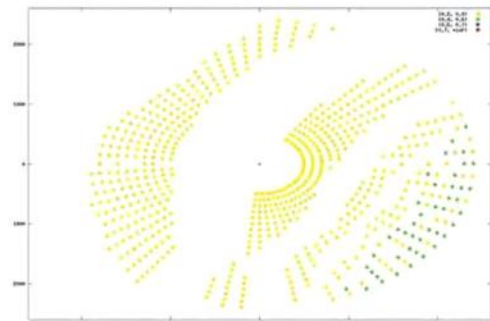


Рис. 1. График зависимости величины бокового отклонения

траектории радиосигнала от азимута на приемник и расстояния между передатчиком (Москва) и приемником

Выводы

Результаты, полученные в ходе моделирования, позволяют сделать следующие выводы:

– проведенное моделирование показало, что эффект непрямого распространения характерен для средне- и высокоширотных трасс, нежели для низкоширотных, что соответствует современным представлениям о физике процесса, основанным на многолетних наблюдениях;

– проведенная обработка результатов моделирования с целью выявления случаев непрямого ионосферного распространения сигнала и анализ частоты возникновения непрямого ионосферного распространения радиосигнала показали, что явление непрямого распространения достаточно часто (8-10% от общего числа трасс) возникает в средних широтах, что ведет к необходимости учитывать это явление, например при пеленгации (требования к точности современных пеленгаторов ~ 0,5-1°), проводя соответствующую коррекцию пеленгов.

Таким образом, в результате проведенной научно-исследовательской работы были получены результаты, которые могут стать основой для проведения дальнейших исследований в этом направлении в целях создания комплексов прогноза параметров ионосферных систем связи нового поколения.

Литература

1. Рыбцев В.В. Расчет параметров ионосферы с учетом высокоширотной коррективки и возможности возникновения спорадического слоя. Труды третьей отраслевой научной конференции-форума «Технологии информационного общества», Т-Comm, Спецвыпуск, апрель 2009, С.25-27.
2. Кучумов А.А., Рыбцев В.В. Расчет параметров состояния ионосферы на суперкомпьютере семейства СКИФ ряда 4 в целях исследования возможности непрямого распространения ионосферного радиосигнала. Доклады Третьей Международной научной конференции Суперкомпьютерные системы и их применение» SSA'2010, г., Минск, т.2, С.84-89, 2010.
3. ISO TS 16457. Space Environment (Natural and Artificial) – Earth's Ionosphere/Plasmasphere model: International Reference Ionosphere, 2003.
4. Mid-Latitude Sporadic-E — A Review by Michael Hawk.
5. Whitehead, J.D., Difficulty Associated with Wind-Shear Theory of Sporadic E, Journal of Geophysical Research, 76, 3127-3135, 1971.
6. Smith, E.K., Worldwide Occurrence of Sporadic E, National Bureau of Standards Circular 582, 1957
7. P. A. Bradley, INGESTING A SPORADIC-E MODEL TO IRI, Pandora, Scotlands Drive, Far&am Common, Slough, BERKS SL2 3ES, UK.
8. Руководство пользователя комплекса программ ITS HF Propagation. Ionospheric communications enhanced profile analysis & circuit (ICEPAC), technical description of ICEPAC propagation prediction program, FRANK G. STEWART.
9. K. Martin, W. Hoffman, Mastering CMake Fourth Edition, Kitware Inc.
10. Богачёв К.Ю. Основы параллельного программирования – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. ISBN 5-94774-037-0.