

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.73-76

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛА ИНЧ В АТМОСФЕРЕ ВЫСОКИХ ШИРОТ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

О.И. Ахметов¹, И.В. Мингалев¹, О.В. Мингалев¹, З.В. Суворова¹, В.Б. Белаховский¹, С.М. Черняков²

¹ФГБНУ "Полярный геофизический институт", г. Апатиты

²ФГБНУ "Полярный геофизический институт", г. Мурманск

Аннотация. В работе обсуждаются результаты численных экспериментов по распространению низкочастотного сигнала в высокоширотном волноводе Земля–ионосфера в различных гелиогеофизических условиях. Профили концентрации, используемые в численных экспериментах, базируются на данных радара частичных отражений Полярного геофизического института, расположенного на радиофизическом полигоне «Туманный» Мурманской области (69.0 с.ш., 35.7 в.д.) и модели IRI2016 во время магнитной бури 17 марта 2013. На основе моделирования распространения гармонического сигнала 1500 Гц в реалистичной высокоширотной ионосфере показаны особенности влияния неоднородностей электронной плотности в зависимости от их размера относительно длины волны. Обсуждается влияние горизонтальной пространственной структуры концентрации электронов на высотах отражения на распространение волны ИНЧ диапазона. Был проведен анализ характеристик сигнала УНЧ, чтобы определить те из них, которые впоследствии можно было бы использовать для мониторинга состояния ионосферы.

1. Введение

Наблюдения ионосферных эффектов солнечных вспышек имеют огромное значение для всех видов деятельности, связанной с распространением радиоволн в атмосфере Земли. Состоянием ионосферы определяются возможности связи в диапазонах СНЧ и ИНЧ в большей мере, чем иными факторами. Исследования влияния ионосферы методами прямых измерений и статистического анализа проводятся десятки лет в большинстве стран мира, в том числе и в области высоких широт. Такие методы не могут обеспечить полностью достоверного разделения различных факторов влияющих на распространение радиоволн. В этом смысле, авторы полагают численные методы исследования помогут значительно упростить сложную задачу косвенной диагностики ионосферы по данным наземных наблюдений электромагнитных сигналов искусственного и природного происхождения. Данный метод позволяет получать чистые от постороннего шума эффекты, распределённые во всем интересующем исследователя пространстве, в отличие от локализованных прямых измерений каких-либо величин.

Целью представленной работы является исследование методами численного эксперимента влияния незначительных изменений в электронной плотности D и E слоя ионосферы на различные характеристики электромагнитных волн. Выработка минимальных и желательных требований к таким системам наземной регистрации электромагнитных сигналов данные которых в дальнейшем могут быть использованы для косвенных исследований параметров ионосферы.

2. Условия среды

Магнитная буря 17 марта 2013 года была вызвана солнечной вспышкой M-класса 15 марта и началась с приходом к магнитосфере межпланетной ударной волны, которая проявилась на земной поверхности в виде импульса SSC (storm sudden commencement) в 06:00 UT. В этот момент скорость солнечного ветра резко увеличилась с ~400 км/с до ~650-700 км/с. V_z -компонента межпланетного магнитного поля стала отрицательной, что обеспечило постоянное поступление энергии в магнитосферу. Индекс SYM-H, характеризующий интенсивность магнитной бури, упал до -100 нТл и оставался на этом уровне. Авроральный AE индекс резко возрос до ~1000 нТл и оставался повышенным. AE индекс показывал в 16:00 UT появление другой авроральной активизации (увеличение AE до ~2500 нТл).

В работе представлены результаты численных экспериментов прохождения электромагнитных сигналов в волноводе Земля–ионосфера при изменениях состояния ионосферы вызванных солнечной вспышкой и последовавшей за ней магнитной бурей в области высоких широт. Профили концентрации, используемые в численных экспериментах, получены при помощи доработки профилей, сгенерированных моделью IRI2016. Доработка базируется на данных средневолнового радиолокатора вертикального излучения для исследования нижней ионосферы, расположенного на радиофизическом полигоне «Туманный» Полярного геофизического

института в Мурманской области (69.0 с.ш., 35.7 в.д.), вовремя и после солнечной вспышки М-класса 15.03.2013 [Терещенко и др., 2003], а именно 15.03.2013 в 09:00 UT (возмущенные условия, вспышка), 16.03.2013 в 9:00 UT (спокойные условия), 17.03.2013 в 6:00 UT (возмущенные условия, SSC) и 16.03.2013 в 6:00 UT (спокойные условия).

3. Модель, сетка, граничные условия и функция источника

Используемая в представленной работе модель распространения электромагнитных сигналов в различных средах построена на основе схемы с противопотоковой аппроксимацией пространственных производных (метод Годунова с коррекцией потоков). Также используется расщепление по пространственным направлениям и по физическим процессам, причем затухание поля сигнала за счет проводимости и его вращение при наличии холловской проводимости среды учитываются на отдельных шагах расщепления по аналитическим формулам. Схема является монотонной, имеет 2-й порядок точности по времени и 3-й по пространственным переменным, а также является консервативной. Основные идеи, лежащие в основе численной схемы описаны в работах [Мингалев И.В. и др., 2018; Мингалев О.В. и др., 2018].

Во всех поставленных в работе численных экспериментах область моделирования представляла собой параллелепипед с основанием 512x1280 км, высотой в атмосфере 150 км и глубиной в литосфере 50 км. Шаги сетки по горизонтали составляли 2 км, по вертикали в атмосфере 1 км и 0,5 км в литосфере. Шаг по времени составлял $4 \cdot 10^{-6}$ с.

В модельных экспериментах на всех внешних границах было задано граничное условие свободного ухода волны, что достигалось обнулением входящего из-за пределов области моделирования потока. Такой подход позволяет получить низкие коэффициенты отражения плоской волны от границ области моделирования: для волн, падающих под углом от 80 до 90 градусов, отношение амплитуды отраженной волны к амплитуде падающей плоской волны не превышает 0,01. При угле падения 60 градусов это отношение уже составляет примерно 0,05, при угле падения 45 градусов - примерно 0,16, при угле падения 27 градусов - примерно 0,33, а при угле падения 18,4 градуса - примерно 0,43 [Мингалев И.В. и др., 2018]. Для сравнения метод FDTD (finite-differences time-domain method) [Yee, 1966] при применении простых граничных условий, таких как условия Мура (Mur) [1981] и Ляо (Liao) [1984], дает отражения порядка 0,1...1 %, но только при падении волны на границу под прямым углом. При падении под острым углом коэффициент отражения растет вплоть до 100 % при падении по касательной. Однако при использовании непрерывно действующего источника даже столь малых отражений, которые порождает применяемая схема, достаточно для накопления ошибок в области моделирования, поэтому возникает необходимость в использовании методов подавления, подобных PML (perfectly matched layer), использующихся в FDTD моделях [Berenger, 1994]. Именно такой тип источника применялся в представленных авторами экспериментах, что привело к необходимости адаптации и применения метода PML. Разделение схемы по пространственным переменным и физическим процессам позволяет применять профиль электрических и магнитных потерь, предложенный Беренгером, непосредственно к потокам противопотоковой схемы на границе области моделирования. Геометрический профиль потерь внутри отдельного слоя имеет вид

$$\rho(r) = -\frac{\epsilon_0 c_0 \ln(g)}{2 \Delta x g^{N-1}} \ln(R_0) g^{(r/\Delta x)}, \quad (1)$$

где g - коэффициент геометрической прогрессии, Δx - шаг по пространству, c_0 - скорость света, N - номер PML-слоя, считая от интерфейса счетного региона и границы, r - расстояние от границы, R_0 - коэффициент отражения от первого слоя. В представленных численных экспериментах авторы используют профиль потерь, рассчитанный по формуле (1) со следующими параметрами: $R_0=0.01$ (1 %), коэффициент прогрессии $g = 2,15$, количество слоев 14. Несмотря на то что коэффициент отражения от первого слоя не лучше, чем характерный для данной схемы при обнулении исходящих потоков на углах падения 80-90 градусов, а на практике даже хуже вследствие отражений от последующих слоев, основным преимуществом метода PML является его крайне слабая зависимость от угла прихода электромагнитной волны. Данную особенность демонстрирует и адаптированный для противопотоковой схемы вариант.

В качестве источника сигнала во всех представленных экспериментах используется поверхность одной из граней расчетной области. Такой источник сигнала позволяет задать не только амплитуду сигнала во времени, но и её распределение в пространстве; задержками можно сформировать фронт волны необходимой формы подобно тому, как это делается в плоской эквидистантной фазированной антенной решетке [Воскресенский и др., 2012]. В экспериментах, обсуждаемых в данной работе, моделировалась плоская волна частотой 1500 Гц (длина волны ~ 200 км), излучаемая в область под прямым углом к плоскости источника. Профиль проводимости литосферы был взят из работы [Korja et al., 2002], проводимость у поверхности составляла $2 \cdot 10^{-5}$ См.

4. Описание экспериментов и обсуждение

В работе авторами были проведены три серии экспериментов с различными типами горизонтального профиля электронной плотности. Эксперимент (1) – вся область имеет концентрацию электронов однородную по

горизонтالي, а по высоте характерную для невозмущенных условий в 06:00 UT; эксперимент (2) – вся область имеет концентрацию электронов однородную по горизонтали, по высоте характерную для условий магнитной бури и высыпания заряженных частиц; эксперименты (3 – 6) – область моделирования имеет неоднородную концентрацию электронов по горизонтали в направлении распространения сигнала высотный профиль плавно изменяется со случая как в эксперименте (1) к случаю описанному для эксперимента (2) при этом градиенты концентрации электронов в области перехода имеют следующие максимальные значения 38,38 м³/км для эксперимента (3), 15,62 м³/км для эксперимента (4), 11,07 м³/км для эксперимента (5), 7,83 м³/км для эксперимента (6); эксперименты (7 – 10) – область моделирования имеет неоднородную концентрацию электронов по горизонтали в направлении распространения сигнала высотный профиль плавно изменяется со случая как в эксперименте (2) к случаю описанному для эксперимента (1) при этом градиенты концентрации электронов в области перехода имеют следующие максимальные значения без учета знака 58,06 м³/км для эксперимента (7), 15,62 м³/км для эксперимента (8), 11,07 м³/км для эксперимента (9), 7,83 м³/км для эксперимента (10); эксперимент (11) – вся область имеет концентрацию электронов однородную по горизонтали, а по высоте характерную для невозмущенных условий в 09:00 UT; эксперимент (12) – вся область имеет концентрацию электронов однородную по горизонтали, а по высоте характерную для вспышки на солнце и ионизации солнечным ультрафиолетом.

Анализ результатов экспериментов для случая переходов от одного профиля концентрации электронов к другому с разными градиентами в зоне перехода - эксперименты (3-6) и (7-10) не выявил значимых различий как фаз сигнала, так и амплитуд (отличия в пределах 1%). Для результатов на значительном расстоянии от источника гораздо большее значение имеет размеры области и его расположение относительно источника чем горизонтальный градиент в зоне перехода.

Исследование волнового сопротивления, рассчитанного как отношение E/H эксперименты (1, 2 и 11, 12) показал, что во всех возмущенных случаях оно выше, чем в невозмущенных. Найдено, что для стабилизации параметров характерных для данного состояния ионосферы требуется расстояние порядка четырех длин волн. Фазы электрической и магнитной части поля заметно по-разному реагируют на изменение параметров волновода Земля – ионосфера. В возмущенных случаях фаза магнитного поля догоняет и перегоняет, фазу электрического.

5. Заключение

Методами численного эксперимента, авторами выполнена задача определения характеристик электромагнитных волн ИНЧ-диапазона регистрируемых на уровне приземного слоя несущих максимальное количество информации о состоянии волновода Земля-ионосфера.

Выявлено влияние горизонтальных градиентов концентрации электронов на амплитуду электромагнитных сигналов ИНЧ диапазона при переходе между областями с различными характеристиками волновода Земля-ионосфера. Показано, что в случае незначительных изменений электронной плотности изменения амплитуды электромагнитного сигнала незначительно и не превышает 1 %.

Выявлено значительное влияние вида вертикального профиля электронной концентрации на волновое сопротивление среды и разность фаз между магнитной и электрической компонентами. Показано, что в случаях увеличения концентрации электронов в D области волновое сопротивление среды увеличивается, а компонента электромагнитного поля E начинает запаздывать относительно H.

Минимально пригодные для мониторинга состояния ионосферы наземные системы регистрации ИНЧ волн должны содержать в своем составе три регистратора: один для вертикальной электрической компоненты и два для горизонтальных магнитных компонент электромагнитного поля. Важно обеспечить качественную синхронизацию между регистраторами и мировым временем.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-77-10018).

Список литературы

- Воскресенский Д.И., Степаненко В.И., Филиппов В.С. и др. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток. Изд.4, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2012. 744с.
- Мингалев И.В., Мингалев О.В., Ахметов О.И., Суворова З.В. Явная схема расщепления для уравнений Максвелла // Математическое моделирование. М.: РАН. 2018. Т. 30. № 12. С. 17-38. DOI:10.31857/S023408790001934-1.
- Мингалев О.В., Мингалев И.В., Мельник М.Н., Ахметов О.И., и др. Новый метод численного интегрирования системы Власова-Максвелла // Математическое моделирование. М.: РАН. 2018. Т. 30. № 10. С. 21-43. DOI:10.31857/S023408790001919-4.

- Терещенко В.Д., Васильев Е.Б., Овчинников Н.А., Попов А.А. Средневолновый радиолокатор Полярного геофизического института для исследования нижней ионосферы, В кн.: Техника и методика геофизического эксперимента, Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН. 2003. с. 37-46.
- Berenger J-P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves // *Journal of Computational Physics*. 1994. V. 114. N 2. P.185-200. DOI:10.1006/jcph.1994.1159.
- Korja T., Engels M., Zhamaletdinov A.A., Kovtun A.A., et al. Crustal conductivity in Fennoscandia—a compilation of a database on crustal conductance in the fennoscandian shield // *Earth Planets Space*. 2002. V. 54. N 5. P.535–558. DOI:10.1186/BF03353044.
- Liao Z.P., Wong H.L., Yang B.P., Yuan Y.F. A transmitting boundary for transient wave analyses // *Scientia Sinica (series A)*. 1984. V. 27. N 10. P.1063-1076.
- Mur G. Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time domain electromagnetic field equations // *IEEE Electromagnetic Compatibility*. 1981. V. 23. N 4. P. 277-382. DOI:10.1109/TEMC.1981.303970.
- Yee K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1966. V. 14. P. 302-307. DOI:10.1109/TAP.1966.1138693.