

О ВОЗМОЖНОСТИ ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ШУМАНОВСКИХ РЕЗОНАНСОВ

Е.С. Гончаров^{1,2}, А.Н. Ляхов¹, Т.В. Лосева¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт динамики геосфер Российской академии наук
²ВНИИА им. Духова, Москва

В статье предложен метод верификации прогностических моделей нижней ионосферы по данным регистрации собственных частот Шумановских резонансов и их сопоставлению с расчетными данными. Расчеты собственных частот выполняются в трехмерной геометрии с неоднородным заполнением волновода земля-ионосфера слабоионизованной столкновительной плазмой. Представлены результаты для двух различных моделей нижней ионосферы для спокойных геофизических условий.

Введение

Актуальность исследований средней атмосферы Земли (40–100 км) резко возросла в последние годы. В первую очередь это связано с развитием глобальных прогностических моделей климата, метеорологических процессов и состояния всей ионосферы. В моделях предыдущего поколения этот интервал высот не рассматривался, что приводило к искусственному заданию граничных условий и снижало качество результатов. Исследуемый диапазон высот практически недоступен для измерений *in situ*. Основным источником данных служат либо результаты решения обратных задач оптических наблюдений ИСЗ (в лимбовом варианте), либо решение обратной задачи распространения радиоволн СДВ-ДВ диапазона. Первый вариант дает данные в асиноптическом варианте, что затрудняет их статистический анализ и картирование. Второй вариант позволяет получать стабильные результаты по следующей схеме: на выбранной трассе – передатчик-приемник – ведется мониторинг амплитуды и фазы радиосигнала; с помощью модели распространения радиоволн и прогностической численной модели нижней ионосферы определяются высотные профили электронной концентрации и частоты столкновений (решается обратная задача); из анализа динамики электронной концентрации делаются выводы о динамических и химических процессах в средней атмосфере [Thomson et al., 2017; Silber, 2017; Thomson, 2010].

Эффективность данного подхода ограничена двумя факторами. Первый – это неопределенность параметров СДВ-ДВ передатчика. Существующие зарубежные станции используются ВМФ и их мощность, режимы излучения, реализуемая диаграмма направленности при активации разных элементов антенных полей неизвестны. Гражданские станции точного времени [Бюллетень..., 2015] работают ограниченное время и не позволяют получать непрерывные данные мониторинга. Второй фактор – это адекватность используемой модели нижней ионосферы. В настоящее время общепринято использовать двухпараметрическую модель [Wait and Spies, 1964]. Данная модель является строго эмпирической, разработанной по данным регистрации СДВ-ДВ сигналов, и вопрос о том, дает ли данная модель физически достоверные профили электронной концентрации или эквивалентную радиоионосферу (эквивалентная радиоионосфера задает среду, при распространении в которой мы получаем амплитуду и фазу радиосигнала, совпадающие с измерениями. Таких эквивалентных радиоионосфер может быть бесконечно много) остается открытым.

Мы предлагаем для решения первой проблемы (неопределенность передатчика) использовать измерения в КНЧ диапазоне частот. В этой части электромагнитного спектра наблюдаются глобальные резонансы, называемые Шумановскими [Shlegel, 2002]. При возбуждении сферического резонатора, образованного землей и ионосферой, природными источниками (электромагнитным излучением разрядов молний) наблюдаются стоячие КНЧ колебания, частота, амплитуда и добротность которых зависят от заполнения резонатора диэлектрической средой, а, следовательно, от параметров нижней ионосферы и средней атмосферы в целом. Технически регистрация таких сигналов значительно проще, чем мониторинг СДВ-ДВ передатчиков. Теоретический спектр собственных частот задается формулой Шумана:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \approx \frac{c}{2\pi R_E} \sqrt{n(n+1)} = 10.6 \sqrt{\frac{n(n+1)}{2}} \quad (1)$$

Радиус R_E Земли в (1) принят равным 6370 км, c – скорость света. Подставляя $n = 1.5$, для первых пяти мод находим значения: $f_1 = 10.6$, $f_2 = 18.3$, $f_3 = 25.9$, $f_4 = 33.5$, $f_5 = 41.1$ Гц. Экспериментально спектр резонансных частот был впервые определен М. Бальсером и Ч. Вагнером в 1960 г. [Balser, 1960]. Оказалось, что экспериментальные значения лежат значительно ниже теоретических. Это расхождение связано с тем, что в отличие от Шумановской постановки, реальные границы резонатора земля-ионосфера имеют сложную конфигурацию: ионосфера представляется собой многокомпонентную плазму неоднородную как в вертикальном, так и в поперечном направлении.

В рамках анализа экспериментальных данных и аналитических моделей изучался отклик собственных частот на ионосферные возмущения [Chapman et al., 1966; Sao et al., 1973; Roldugin et al., 2004; Nickolaenko et al., 2007, 2011]. Однако ограниченные возможности аналитических моделей не позволяют верифицировать наши представления о нижней ионосфере, продолжая оперировать эквивалентными профилями проводимости. Решение этой проблемы видится в переходе к трехмерным расчетным моделям пространственно неоднородного Шумановского резонатора. Предыдущие работы [Yang et al., 2005; Toledo-Redondo et al., 2013; Toledo-Redondo et al., 2016; Pechony et al., 2004] рассматривали начально-краевую задачу, в которой первичный импульс электромагнитного поля многократно распространялся в волноводе до установления стационарного состояния (из которого и определялись параметры Шумановского резонатора). Предлагаемый нами подход основан на прямом решении внутренней задачи электродинамики волновода, заполненного неоднородной диэлектрической средой.

Математическая постановка задачи

Геометрия задачи и граничные условия. Моделируемый резонатор земля-ионосфера задается двумя концентрическими сферами радиусом $R_E = 6370$ км (Земля) и $R_{\text{ион}} = 6470$ км. Собственные частоты данного резонатора определяются из численного решения задачи на собственные значения:

$$\nabla \times \mu^{-1} (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{i\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0 \quad (2)$$

Здесь μ – магнитная проницаемость ионосферы (равная 1), ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, ϵ_r , σ – относительная диэлектрическая проницаемость и проводимость ионосферы, $k_0^2 = \omega^2/c^2$.

На внутренней границе задаются импедансные граничные условия с использованием значений проводимости земной поверхности по модели LWPC [Fergusson, 1998]. Выше 100 км расчетная область дополнена неотражающими граничными условиями (perfectly matched layer) 4-го порядка.

Вычислительная схема. Задача (2) решается методом конечных элементов. Дискретизация (2) выполняется линейными элементами, что сводит задачу (2) к линейной алгебраической задаче на собственные значения. Решение задачи дает комплексные значения собственных частот $f_n^* = f_n + i\delta$, из которых определяется расчетная добротность резонатора $Q = f_n/2\delta$. Такой «полевой» подход к решению задачи (2) приводит к тому, что пространственная структура собственной моды автоматически согласуется с заданными параметрами ионосферы, что реализовано впервые.

Тестирование вычислительной схемы и расчетной программы проводилось по аналитической модели идеального сферического резонатора с идеально проводящими границами. Получено практически точное согласие теоретических и вычисленных собственных частот и кратностей их вырождения.

Модели нижней ионосферы

Заполнение сферического резонатора выполняется заданием проводимости ионосферы (скалярной, в изотропном случае, тензорной при учете геомагнитного поля) как функции широты, долготы, высоты и мирового времени в приближении низких частот:

$$\sigma = \frac{e^2 N_e \nu_{eff}}{m_e (\omega^2 + \nu_{eff}^2)} \approx \frac{e^2 N_e \nu_{eff}}{m_e \nu_{eff}^2} \quad (3)$$

Учет солнечной и геомагнитной активности определяется используемой моделью ионосферы. Для расчетов нами были использованы две модели электронной концентрации N_e : эмпирическая модель [Fergusson, 1998] на основе двухпараметрического экспоненциального приближения [Wait et al., 1964] и плазмохимическая модель, разработанная в ИДГ РАН [Кудрявцев, 2008; Кудрявцев и др., 2009; Стрелков, 2012, 2014; Корсунская и др., 2013]. Распределение электронной концентрации в первой модели определяется высотным профилем:

$$\begin{aligned} N_e(h) &= 75.57 \cdot \nu_{eff}(h) \cdot \exp(\beta(h - H_p)) \\ \nu_{eff}(h) &= 1.86 \cdot 10^{11} \exp(-0.15h) \\ H_p &= 74.37 - 8.087 \cos \chi + 5.779 \cos \theta + 1.213 \cos \varphi - 0.0044W - 6.035X \\ \beta &= 0.5349 - 0.1658 \cos \chi - 0.0854 \cos \theta + 0.1296X \end{aligned} \quad (4)$$

где χ – солнечный зенитный угол (через его значение учитывается сезон, время и координаты), θ – географическая широта, $\varphi = 2\pi(m - 0.5)/12$, где m – номер месяца, W – число солнечных пятен и X – параметр, учитывающий наличие ($X = 1$) или отсутствие ($X = 0$) геомагнитных возмущений.

Во второй модели решаются уравнения химической кинетики 24-х (16 нейтральных и 8 заряженных) компонент ионосферы в диапазоне высот от 30 до 100 км. Модель включает процессы ионизации солнечным рентгеновским и ультрафиолетовым излучением и корпускулярную ионизацию в авроральных широтах.

Результаты расчетов

Рассмотрим результаты решения задачи (2) для произвольно выбранной даты 21 марта на 1200UT. Расчеты проводились на 32-ядерном компьютере с объемом ОЗУ 512 Тб. На экспериментальных данных расщепление частот не различимо – наблюдается только один частотный пик, поэтому для сравнения с экспериментом расчетные значения были адаптированы следующим образом:

$$\begin{aligned} f_n &= \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n f_n^m \\ Q_n &= \frac{f_n}{(f_n^1 - f_n^1) + 0.5(f_n^1/Q_n^1 + f_n^n/Q_n^n)} \end{aligned} \quad (5)$$

Полученные значения собственных частот представлены в табл. 1, результаты для добротностей приведены в табл. 2.

Таблица 1. Собственные частоты (в Гц) Шумановского резонатора

№ частоты	1	2	3	4	5
Идеальный резонатор	7.5	15.0	22.5	30.0	37.5
Двупараметрическая модель	8.6	15.1	21.6	28.0	34.5
Модель ИДГ	7.7	13.7	19.6	25.6	31.5
Эксперимент	7.8	13.8	19.7	25.7	31.7

Таблица 2. Добротности Шумановского резонатора

№ частоты	1	2	3	4	5
Двупараметрическая модель	9.1	9.6	10.2	10.0	10.2
Модель ИДГ	6.2	6.3	6.3	6.3	6.2
Эксперимент	4.6	6.0	6.6	6.8	6.9

Из представленных результатов можно сделать следующие выводы. Во-первых, предлагаемый подход позволяет успешно решать задачу расчета собственных частот Шумановского резонатора для произвольно неоднородной трехмерной нижней ионосферы. Во-вторых, даже простейшее сравнение результатов показывает возможность дискриминации моделей электронной концентрации по точности совпадения измеренных и расчетных собственных частот. Очевидно, плазмохимическая модель дает лучшее согласие с экспериментом. Результаты расчета добротности оказались хуже, что мы объясняем худшим качеством использованной модели нейтральной атмосферы для расчета эффективной частоты соударения электронов с нейтрами.

Необходимо подчеркнуть, что предлагаемый подход верифицирует модель нижней ионосферы глобально, при всех зенитных углах солнца на всех широтах. Анализируемая модель может оказаться исключительно точной в региональном масштабе на коротких временах, и не адекватной в прочих условиях. В дальнейшем созданная вычислительная модель будет использована для верификации модели отклика нижней ионосферы на рентгеновские солнечные вспышки и геомагнитные возмущения.

Комбинация экспериментального мониторинга параметров Шумановского резонанса с численным моделированием в рамках разработанной модели может служить универсальным инструментом отбора и верификации теоретических моделей нижней ионосферы.

Исследования проводились в рамках Гос. задания (проект № 0146-2014-0002).

Литература

Бюллетень В15/2015 эталонные сигналы частоты и времени. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии главный метрологический центр государственной службы времени и частоты РФ. ФГУП «ВНИИФТРИ». 2015. – 24 с.

Корсунская Ю.А., Стрелков А.С. Характеристики фотодиссоционных реакций в Е и D-слоях ионосферы // Динамические процессы в геосферах: Сборник научных трудов ИДГ РАН. М. : ГЕОС. 2013. С. 234–243.

Кудрявцев В.П. Моделирование ионизационно-рекомбинационных процессов в D области ионосферы // Локальные и глобальные проявления воздействий на геосферы: Сб. научных трудов ИДГ РАН. М. : ГЕОС, 2008. С. 203–218.

Кудрявцев В.П., Васильев Д.А. Влияние метеорологических условий в D-области ионосферы на её аэрономические параметры // Проблемы взаимодействующих геосфер: Сб. научных трудов ИДГ РАН. М. : ГЕОС, 2009. С. 322–332.

Стрелков А.С. Вторичное электронообразование в Е- и D-слоях ионосферы в процессе ионизации жестким ультрафиолетовым рентгеновским излучением Солнца // Динамические процессы в геосферах: Сборник научных трудов ИДГ РАН. М. : ГЕОС, 2012. С. 130–139.

Стрелков А.С. Электронно- и ионно-образование электронным ударом на высотах D-, и E-слоев ионосферы // Динамические процессы в геосферах. Выпуск 6: сб. научн. Тр. ИДГ РАН. М. : ГЕОС. 2014. С. 25–34.

Balser M., Wagner C.A. Observations of earth-ionosphere cavity resonances // Nature. 1960. V. 188, № 4751. P. 638–641.

Chapman, F.W., Jones D.L., Todd J.D.W. Observations on the Propagation Constant of the Earth Ionosphere Waveguide in the Frequency Band 8 c/s to 16 kc/s // Radio Science. 1966. T. 1, № 11. C. 1273–1282.

Ferguson J.A. Computer programs for assessment of long-wavelength radio communications, Version 2.0. 1998. Tech. Doc 3030. Space and Naval Warfare Systems Center.

Large D.B., Wait J.R. Cavity Resonator Modes in a Cylindrically Stratified Magnetoplasma // Radio Science. 1966. V. 1, № 6. P. 655–658.

Nickolaenko, A.P., and D.D. Sentman. Line splitting in the Schumann resonance oscillations, Radio Sci. 2007. 42, RS2S13, doi:10.1029/2006RS003473.

Nickolaenko A.P., Yatsevich E.I., Shvets A.V. Universal and local time variations deduced from simultaneous Schumann resonance records at three widely separated observatories // Radio Science. 2011. T. 46, № 5.

Pechony O., Colin P. Schumann resonance parameters calculated with a partially uniform knee model on Earth, Venus, Mars, and Titan // Radio Science. 2004. T. 39, № 5. RS5007.

Roldugin, V.C., Maltsev Y.P., Vasiljev A.N. Diurnal variations of Schumann resonance frequency in NS and EW magnetic components // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2004. T. 109, № A8

Sao, K., Yamashita M., Tanahashi S. Experimental investigations of Schumann resonance frequencies // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. 1973. T. 35, № 11. C. 2047–2053.

Shlegel K., Fullekrug M. 50 Years of Schumann Resonance // Physik in unserer Zeit, 33(6), 256–26, 2002.

Toledo-Redondo S., Salinas A., Morente-Molinera J.A. Parallel 3D-TLM algorithm for simulation of the Earth-ionosphere cavity // Journal of Computational Physics. 2013. T. 236, № 1. C. 367–379.

Toledo-Redondo S., Salinas A., Morente-Molinera J.A. Full 3-D TLM simulations of the Earth-ionosphere cavity: Effect of conductivity on the Schumann resonances // Journal of Geophysical Research A: Space Physics. 2016. T. 121, № 6. C. 5579–5593.

Thomson, N.R. (2010), Daytime tropical D region parameters from short path VLF phase and amplitude // J. Geophys. Res., 115, A09313, doi:10.1029/2010JA015355.

Thomson, N.R., M.A. Clilverd, and C.J. Rodger (2017), Midlatitude ionospheric D region: Height, sharpness, and solar zenith angle // *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, doi:10.1002/2017JA024455.

Yang Heng, Pasko Victor P. Three-dimensional finite difference time domain modeling of the Earth-ionosphere cavity resonances // *Geophysical Research Letters*. 2005. V. 32, № 3. L03114.

Wait, J.R. Electromagnetic waves in stratified media International series of monographs on electromagnetic waves Pergamon Press book. 1962. – 372 p.

Wait, J.R., and K.P. Spies (1964), Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves, NBS Tech. Note 300, Natl. Bur. of Stand., Boulder, Colo.