

функция $f(t)$ – гладкая дифференцируемая функция с квазисингулярным поведением вблизи ”особых” точек t_l для скелетона ВП. При этом на любой экстремальной l -ой линии для максимумов модулей откликов ВП имеет место скейлинговое соотношение (см. (2) – (4)):

$$W(\tau, t_l)_{\max} \propto \tau^2. \quad (5)$$

Далее, с учетом соотношений (1) и (5), для исследуемой случайной функции может быть применена стандартная процедура фрактального формализма с последующим определением мультифрактального спектра исследуемого турбулентного процесса [3,4].

Но при дистанционном зондировании ИТ сигналами ИСЗ и обработке их методом ММВП возникают непреодолимые сложности. Дело в том, что даже модель фазового экрана (модель ”тонкого” неоднородного слоя толщины L с отсутствием дифракционных эффектов при распространении радиоволн в этом слое) работает лишь, когда выполняется неравенство $\lambda L \ll l^2$ (где λ – длина волны излучаемого сигнала; l – характерный размер неоднородностей) [5]. Для диагностики ”чистых” фазовых флуктуаций сигнала на выходе такого слоя при исследовании неоднородной турбулентной структуры с характерными размерами в несколько единиц – десятков метров (масштаб $l \geq l_0$, где $l_0 \approx 1$ м – внутренний масштаб плазменной турбулентности верхней ионосферы [6]), на частоте зондирования 1 ГГц толщина слоя L должна не превышать нескольких десятков метров. Такая ситуация является практически нереальной для ионосферных условий, когда характерный размер толщины слоя ионосферной плазмы с мелкомасштабными неоднородностями составляет несколько единиц – десятков километров [6]. А в таком ”толстом” слое будут существенны дифракционные эффекты при распространении радиоволн. Что, в конечном счете, приведет к ”замыванию” тонкой квазисингулярной структуры неоднородной ИТ и к невозможности диагностики ее методом ММВП при наземном приеме сигналов ИСЗ (см. [7]).

Поэтому для исследования тонкой структуры ИТ следует применять прямые зондовые измерения флуктуаций электронной концентрации $\Delta N(x)$ с высокой частотой отсчетов $\nu_{отсч} \geq 10$ кГц вдоль траектории космического аппарата в ионосфере. Мультифрактальная обработка таких прямых зондовых записей сигнала $\Delta N(x)$ с помощью метода ММВП, в принципе, позволит выявлять тонкую фрактальную структуру ионосферной турбулентности.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ №09-02-97026-р_поволжье_a.

Литература

1. Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Рахлин А.В. // Изв. ВУЗов-Радиофизика. 2009. т. 52, №1. С. 14.
2. Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Рахлин А.В. // Изв. ВУЗов-Радиофизика. 2008. т. 51, № 4. С. 287.
3. Arheodo A. et al. // Physica A. 1998, **254**. P. 24-45.
4. Павлов А.И., Анищенко В.С. // УФН. 2007. т. 177, № 8. С. 859.
5. Рытов С. М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Т. II. М.: Наука, 1978.
6. Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. М.: Наука, 1984.
7. Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Рахлин А.В. Некоторые особенности перспективных исследований мультифрактальной структуры мелкомасштабной ионосферной турбулентности с использованием вейвлет-преобразования. Препринт №528. Нижний Новгород: ФГНУ НИРФИ, 2009.

О ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЕ МЕЛКОМАСШТАБНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ ABOUT SPATIALLY NON-UNIFORM STRUCTURE OF SMALL-SCALE MID-LATITUDE IONOSPHERE TURBULENCE

Ф. И. Выборнов, В. А. Алимов, А. В. Рахлин

Федеральное государственное научное учреждение ”Научно-исследовательский радиофизический институт”

We present the results of the researches of inhomogeneous small-scale ionosphere turbulence structure using the method of multidimensional structure functions of the amplitude fluctuations of artificial satellites signals. Found significant differences in the behavior of multi-indices of power spectra of the irregularities and the generalized multiracial spectrum of mid-latitude ionosphere turbulence for different clouds of electron density of ionosphere plasma with dimensions of $200 \div 250$ km, and within the clouds for local non-uniform structures with dimensions of $12 \div 15$ km.

Известно, что мелкомасштабная ионосферная турбулентность имеет облачную пространственно-неоднородную структуру. В меньшей степени исследована локальная структура мелкомасштабной ионосферной турбулентности внутри отдельных облаков ионосферной плазмы. Считается, что пространственные спектры мелкомасштабной ионосферной турбулентности имеют моностепенный характер с незначительными вариациями показателя [1]. Этот результат был получен в ходе традиционной спектральной обработки принимаемых на Земле сигналов спутников. Такой спектральный подход к обработке данных дает достоверные результаты лишь в случае, когда исследуемые случайные процессы являются стационарными [2].

Более общий подход к анализу сигналов заключается в их мультифрактальной обработке с применением метода многомерных структурных функций [3]. В ходе наших экспериментов по радиопросвечиванию среднеширотной ионосферы сигналами спутников было установлено, что для структурных функций флуктуаций амплитуды сигналов при небольшом разнесении времени τ справедливо следующее соотношение:

$$\left\langle |\Delta A(\tau)|^q \right\rangle = \frac{1}{T} \int_0^T |A(t+\tau) - A(t)|^q dt \propto \tau^{\varphi_A(q)} \propto \tau^{\alpha_q} \mathbf{I}^{-D_A(\alpha_q)}_- . \quad (1)$$

Здесь T – временной интервал анализируемой амплитуды сигнала. $\varphi_A(q)$ – показатель скейлинга при аппроксимации измеряемых структурных функций флуктуаций амплитуды q -го порядка. $D_A(\alpha_q)$ – фрактальная размерность флуктуаций амплитуды принимаемых сигналов, определяемая на множестве q структурных функций из параметрической зависимости [3,4]:

$$\begin{cases} D_A(\alpha_q) = 1 \pm \mathbf{I}_{q, q - \varphi_A(q)}_- \\ \alpha_q = \frac{d\varphi_A(q)}{dq} \end{cases} . \quad (2)$$

Знак “+” перед вторыми слагаемыми в соотношениях (1), (2) соответствует случаю классического мультифрактального анализа сигналов с параметром $\frac{d\alpha_q}{dq} < 0$, а знак “–” – случаю аномального скейлинга в поведении измеряемых структурных функций q -го порядка, когда параметр $\frac{d\alpha_q}{dq} > 0$.

Согласно [4,5], локальную структуру мелкомасштабной ионосферной турбулентности можно охарактеризовать квазиизотропным трехмерным спектром $\Phi_{N_q}(\vec{k})$ флуктуаций электронной концентрации в виде:

$$\Phi_{N_q}(\vec{k}) \propto k^{-p_{3q}} , \quad (3)$$

где $k_{\perp} = |\vec{k}|$ – волновое число неоднородностей; p_{3q} – показатель спектра неоднородностей для q -ой компоненты, соответствующей глобальной структурной функции электронной концентрации $\langle \mathbf{I}_{N_q}(\vec{r})^{\frac{2}{q}} \rangle$:

$$\langle \mathbf{I}_{N_q}(\vec{r})^{\frac{2}{q}} \rangle \propto \overline{\mathbf{I}_{N_q}(\vec{r})^{\frac{2}{q}}_{q-лок}} \cdot \bar{N} \propto r^{p_{3q}-3} \cdot r^{\pm \mathbf{I}_{D_N(p_{3q})}}_- . \quad (4)$$

Соотношение (4) отвечает двум принципиально различным моделям фрактальных структур мелкомасштабной ионосферной турбулентности [4,5].

Первая модель, соответствующая знаку “+” в показателе второго сомножителя соотношения (4) – это совокупность независимых фрактальных структур, характеризуемых локальной пространственной структурной функцией $\overline{\mathbf{I}_{N_q}(\vec{r})^{\frac{2}{q}}_{q-лок}} \propto r^{p_{3q}-3}$; $\bar{N} \propto r^{\mathbf{I}_{D_N(p_{3q})}}_-$ – доля пространства, занятого этими неоднородными структурами с фрактальной размерностью $D_N(p_{3q})$ [5]. Это модель классической мультифрактальной структуры турбулентности.

Вторая модель (знак “–” в показателе второго сомножителя соотношения (4)) – это совокупность взаимодействующих, кластерных фрактальных структур с локальной пространственной структурной функцией $\overline{\mathbf{I}_{N_q}(\vec{r})^{\frac{2}{q}}_{q-лок}} \propto r^{p_{3q}-3}$ и относительным числом таких структур $\bar{N} \propto r^{\mathbf{I}_{D_N(p_{3q})}-3}$. В данном случае $D_N(p_{3q})$ – это массовая фрактальная размерность взаимодействующих структур в пространстве с топологической размерностью $d=3$

($D_N(p_{3_q}) \leq 3$). Первая модель, по-видимому, соответствует линейной стадии развитой ионосферной турбулентности, а вторая – режиму нелинейного взаимодействия локальных пространственно-неоднородных мелкомасштабных структур электронной концентрации в ионосфере (см. [4]).

При этом согласно [5], для показателя мультистепенного спектра ионосферной турбулентности на средних широтах имеет место равенство:

$$p_{3_q} = 2 + 2\alpha_q. \quad (5)$$

Таким образом, изотропная локальная структура мелкомасштабной ионосферной турбулентности, описываемая мультистепенным спектром $\Phi_{N_q}(\vec{k})$ (см. (3)), однозначно определяется набором соответствующих гильдеровских экспонент α_q .

Следует заметить, что неравномерное распределение в пространстве изотропных мелкомасштабных ионосферных неоднородностей в общем случае характеризуется набором фрактальных размерностей $D_N(\alpha_q)$. Причем, согласно [3,4]:

$$D_N(\alpha_q) = 2 + D_A(\alpha_q).$$

Поскольку для параметров α_q и показателей мультистепенного спектра p_{3_q} справедливо соотношение (5), то, следовательно, измеряемый мультифрактальный спектр флуктуаций амплитуды $D_A(\alpha_q)$ фактически характеризует неравномерное распределение в пространстве мелкомасштабных ионосферных неоднородностей для разных турбулентных структур с различными показателями мультистепенного спектра.

По результатам зондирования среднеширотной ионосферы в сеансах связи с орбитальными спутниками 29.03.06 г. и 23.08.05 г. были получены записи амплитуды сигналов с практически идентичными величинами показателей спектров флуктуаций амплитуд принимаемых сигналов, но в то же время мультифрактальные спектры их различались кардинально. Для первого сеанса связи длительностью $T_0 = 80$ с была характерна первая модель фрактальных структур мелкомасштабной ионосферной турбулентности, а для второго – вторая модель. Внутри общего интервала регистрации сигналов как в одном, так и другом сеансах связи для более коротких интервалов записи длительностью $T_L = 5$ с регистрировались обе указанные выше модели фрактальных структур.

Следует учесть, что в этих экспериментах мы имели дело с моделью ”вмороженных” мелкомасштабных ионосферных неоднородностей (скорость сканирования неоднородностей сигналом орбитального спутника на высотах верхней ионосферы $v_{ск} \approx (2,5 \div 3)$ км/с была значительно больше скорости дрейфа мелкомасштабных неоднородностей $v_{др} \approx 10^{-1}$ км/с). Поэтому можно утверждать, что в ионосфере на пространственных масштабах порядка $L_L = v_{ск} \cdot T_L \approx (12 \div 15)$ км внутри отдельных облаков электронной концентрации ионосферной плазмы с масштабами порядка $L_0 = v_{ск} \cdot T_0 \approx (200 \div 250)$ км существовали мелкомасштабные неоднородности с различной фрактальной структурой, соответствующие как линейной стадии развитой ионосферной турбулентности (первая модель в соотношении (4)), так и нелинейные пространственно-неоднородные мелкомасштабные структуры электронной концентрации в ионосфере, описываемые второй моделью в соотношении (4). Этим различным локальным моделям мультифрактальной структуры мелкомасштабной ионосферной турбулентности соответствуют различные модели мультистепенных спектров изотропной турбулентности.

На рис. 1 приведены рассчитанные по формуле (5) показатели p_{3_q} мультистепенных спектров $\Phi_{N_q}(\vec{k})$ (3) для обоих сеансов связи с искусственными спутниками Земли 29.03.06 г. (рис. 1а) и 23.08.05 г. (рис. 1б). Из рис.1 следует, что поведение показателей мультистепенных спектров для двух характерных моделей фрактальных структур в этих сеансах резко отличались друг от друга. Для первой модели характерно существование пространственных компонент с малыми масштабами неоднородностей в мультистепенном спектре турбулентности (см. рис. 1а), а для второго – практически полное отсутствие их (см. рис. 1б). Действительно, в первом случае значения показателей мультистепенного спектра уменьшаются с ростом q -го порядка для исследуемых многомерных структурных функций флуктуаций амплитуды принимаемого сигнала

(см. рис. 1а и соотношение (5) при $\frac{d\alpha_q}{dq} < 0$), т.е. в данном случае мы с увеличением параметра q изучаем локальные области мелкомасштабной ионосферной турбулентности с все более развитой (многомасштабной) структурой неоднородностей электронной концентрации плазмы. Во втором случае (см. рис. 1б и соотношение (5) при $\frac{d\alpha_q}{dq} > 0$) значения p_{3q} увеличиваются с ростом параметра q и мы, при увеличении параметра q , исследуем локальные области турбулентности с все более пространственно ограниченной структурой мелкомасштабных неоднородностей.

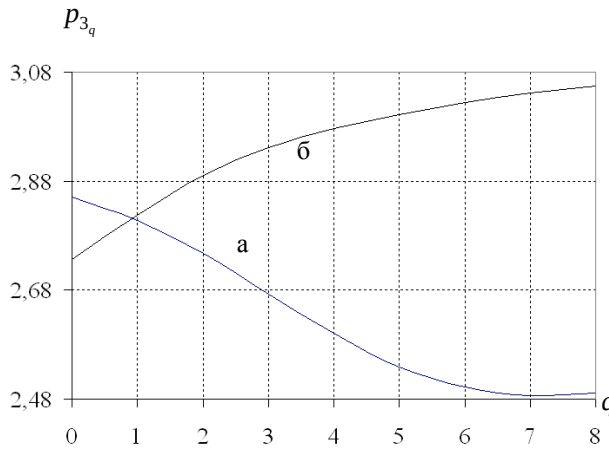


Рис. 1.

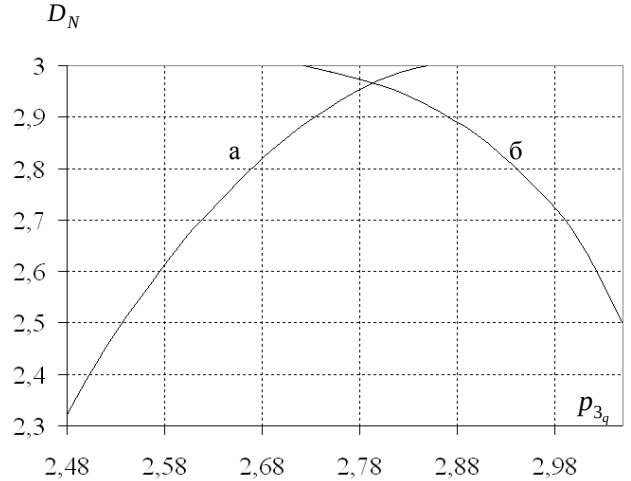


Рис. 2.

На рис. 2 представлены обобщенные мультифрактальные спектры изотропной мелкомасштабной ионосферной турбулентности $D_N(p_{3q})$ для сеанса связи со спутниками 29.03.06 г. (рис. 2а) и 23.08.05 г. (рис. 2б). Из рис. 2 видно, что обобщенные мультифрактальные спектры $D_N(p_{3q})$ также обнаруживают различия в своем поведении для разных моделей мультифрактальных структур. Для первой модели (линейная стадия ионосферной турбулентности) локальные области с развитой (многомасштабной) структурой неоднородностей электронной концентрации имеют заметно неравномерное распределение в пространстве ($D_N = 2,4$ при $p_{3q} = 2,5$; рис. 2а), а области с пространственно ограниченной структурой мелкомасштабных неоднородностей распределены более равномерно ($D_N = 3$ при $p_{3q} = 2,84$; рис. 2а). Для второй модели (модели взаимодействующих, кластерных фрактальных структур) ситуация меняется на противоположную. Более развитая структура мелкомасштабных неоднородностей равномерно распределена в пространстве ($D_N \approx 3$ при $p_{3q} = 2,7$; рис. 2б), а пространственное распределение локальных областей неоднородностей с ограниченной мелкомасштабной структурой неравномерно ($D_N = 2,5$ при $p_{3q} = 3,05$; рис. 2б).

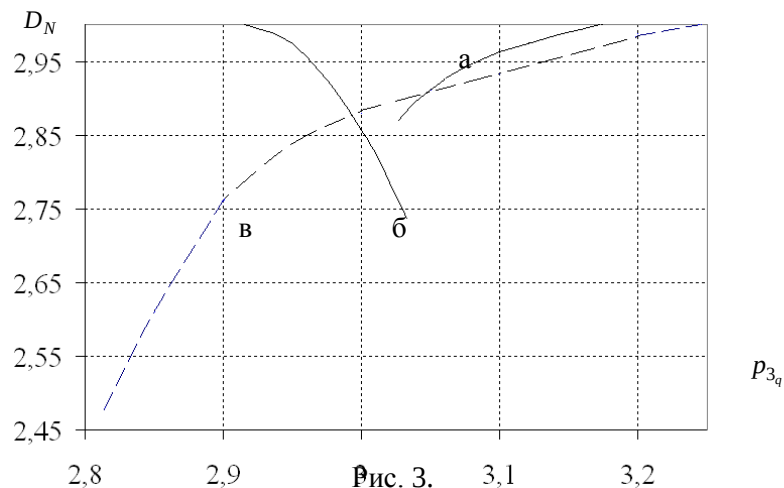


Рис. 3.

Были выполнены расчеты мультистепенных и обобщенных мультифрактальных спектров для 5-ти секундных интервалов записей амплитуды внутри сеансов 29.03.06 и 23.08.05 г. Они также показали существенные различия, которые присущи обоим моделям локальных фрактальных структур мелкомасштабной ионосферной турбулентности на указанных выше масштабах $L_L \approx (12 \div 15)$ км внутри отдельных облаков электронной концентрации ионосферной плазмы с размерами $L_0 \approx (200 \div 250)$ км. Это иллюстрирует рис. 3, на котором приведены обобщенные мультифрактальные спектры турбулентности $D_N(p_{3_q})$ для трех последовательных (а, б, в) пятисекундных интервалов регистрации записи амплитуды сигнала в сеансе связи со спутником 29.03.06 г. Из рис. 3 следует, что распределение в пространстве мелкомасштабных неоднородностей может кардинально меняться для разных турбулентных структур с различными показателями мультистепенных спектров внутри отдельных облаков ионосферной плазмы.

Таким образом, исследования неоднородной структуры мелкомасштабной ионосферной турбулентности с применением метода многомерных структурных функций флуктуаций амплитуды сигналов обнаружили существенные различия в поведении показателей мультистепенных спектров неоднородностей и соответствующих обобщенных мультифрактальных спектров ионосферной турбулентности как для разных облаков электронной концентрации ионосферной плазмы с размерами $\sim (200 \div 250)$ км, так и внутри отдельных облаков для локальной неоднородной структуры с размерами $\sim (12 \div 15)$ км. Это принципиально новый результат в исследованиях неоднородной структуры ионосферной турбулентности.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ №09-02-97026-р_поволжье_а.

Литература

1. Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. М.: Наука, 1984.
2. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967.
3. Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Рахлин А.В. // Изв.ВУЗов. Радиофизика. 2008. Т. 51. № 4. С.287.
4. Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Рахлин А.В. // Изв.ВУЗов. Радиофизика. 2008. Т. 51. № 7. С. 571.
5. Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Рахлин А.В. // Изв.ВУЗов. Радиофизика. 2009. Т. 52. №1. С. 14.

ВЛИЯНИЕ ВЕТРОВОЙ ОБСТАНОВКИ НА ЕСТЕСТВЕННОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

INFLUENCE OF WIND CONDITIONS ON NATURAL ELECTROMAGNETIC EMISSION

Дружин Г.И., Санников Д.В., Уваров В.Н.

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

Statistical relations of wind situation with level of natural electromagnetic radiation in a ELF-VLF range are considered. Closely-coupled statistical interface between the level of electric components of the field and wind field discovered. Existence of periodic temporal connection of the field of winds velocity and magnetic components of the radiation in a range 0.2-6.5 kHz with a day's and two day's by periods discovered.

Естественное электромагнитное КНЧ-ОНЧ-излучение возникает за счет грозových, ионосферно-магнитосферных и литосферных источников [1–6], вклад которых в общую интенсивность поля определяются различными геофизическими факторами. Необходимость исследования этих излучений обусловлена тем, что они могут служить источником информации о процессах космического, планетарного и регионального масштабов. Полученная информация может быть использована не только в науке, но и в практической деятельности человека, например, в медицине, авиации, связи, при прогнозе сейсмической активности. Настоящая работа посвящена исследованию взаимосвязи естественного электромагнитного ОНЧ-излучения с ветровой обстановкой.

Регистрация естественного электромагнитного излучения проводится на Камчатском полуострове в пункте «Паратунка» ИКИР ДВО РАН, в диапазоне частот от единиц Гц до ~ 10 кГц, с применением двух идентичных магнитных рамочных (компоненты H_x , H_y) и одной электрической штыревой (компонента E) антенн. Многовитковые рамочные антенны с эквивалентной площадью каждой ~ 5600 м² расположены вертикально и ориентированы в направлении север-юг (H_x) и восток-запад (H_y). Штыревая электрическая антенна (с емкостной насадкой) высотой 1 м расположена на мачте высотой 30 м в непосредственной близости от магнитных антенн. Диаграммы направленности рамочных антенн и в горизонтальной плоскости имеют вид «восьмерки», штыревой – круг. Сигналы с предварительных усилителей по кабельной