

Особенности мультифрактальной структуры мелкомасштабной среднеширотной ионосферной турбулентности

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

*Федеральное государственное научное учреждение
"Научно-исследовательский радиофизический институт" (ФГНУ НИРФИ),
603950, г. Нижний Новгород, ул. Б. Печерская, д. 25/12а
E-mail: vybornov@nirfi.sci-nnov.ru*

Рассмотрены особенности мультифрактальной структуры мелкомасштабной среднеширотной ионосферной турбулентности по результатам радиопросвечивания неоднородностей ионосферы сигналами искусственных спутников Земли с применением мультифрактальной обработки сигналов. В ходе мультифрактального анализа амплитуды сигналов обнаружены существенные различия в поведении показателей мультистепенных спектров мелкомасштабных неоднородностей и соответствующих обобщенных мультифрактальных спектров мелкомасштабной 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 мелкомасштабной ионосферной турбулентности с размерами $\sim(12\div 15)$ км.

Ключевые слова: ионосфера, мультифрактальная структура, ионосферная турбулентность, мелкомасштабные неоднородности, радиоволны, мультистепенные спектры.

В результате спектральной обработки принимаемых на Земле радиосигналов искусственных спутников установлено, что пространственные спектры мелкомасштабной ионосферной турбулентности имеют моностепенный характер с незначительными вариациями показателя. Такой спектральный подход к обработке данных справедлив лишь в случае, когда исследуемые случайные процессы являются стационарными [1, 2]. Но известно, что мелкомасштабная ионосферная турбулентность имеет облачную пространственно-неоднородную структуру, причем локальная структура мелкомасштабной ионосферной турбулентности внутри отдельных облаков ионосферной плазмы исследована в меньшей степени.

Более общий подход к анализу сигналов искусственных спутников Земли (ИСЗ) 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:

$$\langle |\Delta A(\tau)|^q \rangle = \frac{1}{T} \int |A(t+\tau) - A(t)|^q dt \propto \tau^{\varphi_A(q)} \propto \tau^{\alpha_q q \pm [1 - D_A(\alpha_q)]}. \quad (1)$$

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]:

$$\left\{ \begin{array}{l} D_A(\alpha_q) = 1 \pm [\alpha_q(q) - \varphi_A(q)] \\ \alpha_q = \frac{d\varphi_A(q)}{dq} \end{array} \right. . \quad (2)$$

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 $\langle [\Delta N(\vec{r})]_q^2 \rangle$:

$$\langle [\Delta N(\vec{r})]_q^2 \rangle \propto \overline{[\Delta N(\vec{r})]_{q_лок}^2} \cdot \bar{N} \propto r^{p_{3q}-3} \cdot r^{\pm[3-D_N(p_{3q})]}. \quad (4)$$

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

Первая модель, соответствующая знаку "+" в показателе второго множителя соотношения (4) – это совокупность независимых фрактальных структур, характеризуемых локальной пространственной структурной функцией $\overline{[\Delta N(\vec{r})]_{q_лок}^2} \propto r^{p_{3q}-3}$; $\bar{N} \propto r^{3-D_N(p_{3q})}$ – 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 множителя соотношения (4)) – это совокупность взаимодействующих, кластерных фрактальных структур с локальной пространственной структурной функцией $\overline{[\Delta N(\vec{r})]_{q_лок}^2} \propto r^{p_{3q}-3}$ и относительным числом таких структур $\bar{N} \propto r^{D_N(p_{3q})-3}$. В данном случае $D_N(p_{3q})$ – это массовая фрактальная размерность взаимодействующих структур в пространстве с топологической размерностью $d = 3$ ($D_N(p_{3q}) \leq 3$). 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 гельдеровских 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]:

$$D_N(\alpha_q) = 2 + D_A(\alpha_q). \quad (6)$$

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 в 2005, 2006 годах были получены многочисленные записи амплитуды сигналов с практически идентичными величинами показателей спектров флуктуаций амплитуд принимаемых сигналов, но в то же время мультифрактальные спектры их различались кардинально. Для обработки использовались интервалы записи длительностью $T_0 = 80$ с. Для части сеансов связи была характерна первая модель фрактальных структур мелкомасштабной ионосферной турбулентности, а для остальных – вторая модель. Причем, внутри общего интервала анализа 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.

Поведение показателей p_{3_q} мультистепенных спектров $\Phi_{N_q}(\vec{k})$ для двух характерных моделей фрактальных структур резко отличались друг от друга. Для первой модели характерно существование пространственных компонент с малыми масштабами неоднородностей в мультистепенном спектре турбулентности, а для второго – практически полное отсутствие их. Действительно, в первом случае значения показателей мультистепенного спектра уменьшаются с ростом q -го порядка для исследуемых многомерных структурных функций флуктуаций амплитуды принимаемого сигнала, 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 значения p_{3_q} увеличиваются с ростом параметра q и мы, при увеличении параметра q , исследуем локальные области турбулентности с все более пространственно ограниченной структурой мелкомасштабных неоднородностей.

Для первой модели (линейная стадия ионосферной турбулентности) локальные области с развитой (многомасштабной) структурой неоднородностей электронной концентрации имеют заметно неравномерное распределение в пространстве (в сеансе 29.03.06 г. $D_N = 2,4$ при $p_{3_q} = 2,5$), а области с пространственно ограниченной структурой мелкомасштабных неоднородностей распределены более равномерно ($D_N \approx 3$ при $p_{3_q} = 2,84$). Для второй модели (модели взаимодействующих, кластерных фрактальных структур) ситуация меняется на противоположную. Более развитая структура мелкомасштабных неоднородностей равномерно распределена в пространстве (в сеансе 23.08.05 г. $D_N \approx 3$ при $p_{3_q} = 2,7$), а пространственное распределение локальных областей неоднородностей с ограниченной мелкомасштабной структурой неравномерно ($D_N = 2,5$ при $p_{3_q} = 3,05$).

Были выполнены расчеты мультистепенных и обобщенных мультифрактальных спектров и для 5-ти секундных интервалов записей амплитуды внутри интервала анализа (в том числе и для сеансов 29.03.06 и 23.08.05 г.). Они также показали существенные различия, которые присущи этим 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. Следовательно, распределение в пространстве мелкомасштабных неоднородностей может кардинально меняться для разных турбулентных структур с различными показателями мультистепенных спектров внутри отдельных облаков ионосферной плазмы.

Исследования неоднородной структуры мелкомасштабной ионосферной турбулентности с применением метода многомерных структурных функций флуктуаций амплитуды сигналов позволили обнаружить 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.

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

Литература

1. Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме // М.: Наука, 1984. 392 с.
2. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере // М.: Наука, 1967.
3. Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Рахлин А.В. О некоторых особенностях фрактальной структуры развитой мелкомасштабной ионосферной турбулентности // Изв.ВУЗов. Радиофизика. 2008. Т. 51. №4. С.287-294.
4. Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Рахлин А.В. К вопросу об истинных значениях показателей спектров мелкомасштабной ионосферной турбулентности // Изв.ВУЗов. Радиофизика. 2008. Т. 51. № 7. С.571-574.
5. Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Рахлин А.В. О мультистепенном спектре мелкомасштабной ионосферной турбулентности // Изв.ВУЗов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 1. С. 14-22.

Particularities of multifractal structure of small-scale mid-latitude ionosphere turbulence

V.A. Alimov, F.I. Vybornov, A.V. Rakhlin

*Radiophysical Research Institute,
603950, Nizhny Novgorod, B. Pecherskaya st., 25/12a
E-mail: vybornov@nirfi.sci-nnov.ru*

We present the results of the researches of multifractal small-scale ionosphere turbulence structure using the multifractal analyses 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 multifractal 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.

Key words: ionosphere, multifractal structure, ionosphere turbulence, small-scale irregularities, radio waves, multi power specters.