

Фазовый метод исследования фрактальной структуры турбулентности ионосферной плазмы

Ф.И. Выборнов, В.А. Алимов, 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 применения фазового метода исследований мультифрактальной структуры турбулентности ионосферной плазмы, который базируется на измерении многомерных структурных функций (МСФ) q -го порядка для фазовых флуктуаций принимаемых на Земле сигналов ИСЗ. Приводятся результаты мультифрактальной обработки сигналов навигационных ИСЗ, принятых во время сильных искусственных ионосферных возмущений, вызванных работой нагревного стенда СУРА.

Ключевые слова: ионосфера, ионосферная турбулентность, радиоволны, фазовые флуктуации, мелкомасштабные неоднородности, структурные функции, мультифрактальная структура.

Введение

Космические исследования неоднородной структуры электронной концентрации в ионосфере весьма интенсивно проводились в 60 – 90 годах прошлого столетия после запуска первого искусственного спутника Земли (ИСЗ) в 1957 г. После обнаружения в начале 70-х годов степенного характера спектра ионосферной турбулентности большое внимание стало уделяться изучению спектральных характеристик ионосферной турбулентности в различных геофизических условиях, в том числе и при воздействии на ионосферу мощным коротковолновым (КВ) радиоизлучением. Во всех этих многочисленных ионосферных исследованиях применялись стандартные методы спектрального анализа флуктуирующих сигналов, пригодные для статистической обработки квазистационарных случайных процессов. Такой традиционный подход к анализу случайных процессов опирался на измерение корреляционных функций или, что эквивалентно, спектров мощности принимаемых сигналов. Достоинствами этого метода является его наглядность и относительная простота. Он базируется на строгом математическом фундаменте – корреляционной теории случайных процессов.

Но он имеет и очевидные ограничения. Спектральный метод оперирует лишь со вторыми моментами одно и двухточечных распределений вероятностей исследуемого процесса. Но своими вторыми моментами описываются только, строго говоря, гауссовы процессы на интервале их стационарности (однородности). А в общем случае необходимы сведения о моментах более высокого порядка. При этом с ростом порядка учитываемых моментов растет и сложность в описании и интерпретации наблюдаемых явлений в исследуемых случайных процессах.

Поэтому в подобных условиях важны оценки небольшого числа величин, которым можно придать определенный физический смысл. Таким достоинством обладает фрактальный подход, который достаточно интенсивно применяется в исследованиях гидродинамической турбулентности, а в последние годы и в ионосферных исследованиях.

Особенности и методика исследований мультифрактальной структуры ионосферной плазмы фазовым методом

В последние годы были выполнены экспериментальные исследования мультифрактальной структуры естественной и искусственной ионосферной турбулентности с использованием метода радиопросвечивания сигналами ИСЗ. В цикле работ (Алимов и др., 2007; 2008а; 2009а) подробно изложен амплитудный метод исследований, который базируется на измерении многомерных структурных функций флуктуаций амплитуды сигналов, принимаемых от орбитальных искусственных спутников Земли (ИСЗ). Однако этот метод имеет ряд существенных недостатков:

1. Метод работает в условиях слабых флуктуаций фазы принимаемых сигналов, что позволяет получать информацию о мультифрактальной структуре лишь мелкомасштабных неоднородностей ионосферной плазмы с размерами, меньшими характерного масштаба зоны Френеля $l_{fp} = \sqrt{z/k}$ (z – приведенное расстояние от ИСЗ до точки наблюдения на Земле; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, λ – длина волны излучения).

2. В условиях сильных фазовых возмущений сигнала в ионосфере измеряемые структурные функции амплитудных флуктуаций оказываются в насыщении и извлечь информацию о мультифрактальной структуре даже мелкомасштабных ионосферных неоднородностей с размерами в десятки-сотни метров в этом случае не представляется возможным.

3. Для амплитудного метода характерной является очень ограниченная область инерциального интервала исследуемой плазменной турбулентности с масштабами неоднородностей электронной концентрации $l_{min} \leq l \leq l_{fp}$. Здесь l_{min} – минимальный размер плазменных неоднородностей, обнаружимых в условиях реального шумового фона эксперимента по дистанционному зондированию околоземной или космической плазмы. Например, при диагностике ионосферной плазмы сигналами орбитальных ИСЗ типа "Парус" характерный размер l_{fp} составляет несколько сотен метров, а l_{min} – не менее нескольких десятков метров (Алимов и др., 2007; 2008а; 2009а). И далеко не всегда может быть уверенно проведена мультифрактальная обработка разности амплитуд принимаемых сигналов для соответствующего небольшого временного интервала с характерными значениями 0,1 – 0,3 с (Алимов и др., 2007; 2008а; 2009а).

Для исследований мультифрактальной структуры ионосферной и космической плазмы может быть использован фазовый метод, который не имеет указанных недостатков. Фазовый метод диагностики неоднородной структуры ионосферной и космической плазмы широко применялся в радиофизических исследованиях еще прошлого столетия (Алимов, Рахлин, 2005а; 2005б). В многочисленных работах этого периода, как правило, применялась спектральная обработка принимаемых сигналов, что позволяло получить лишь ограниченную информацию о частотном спектре и структурной функции фазовых флуктуаций 2-го порядка принимаемых сигналов.

Фазовый метод исследований мультифрактальной структуры ионосферной и космической плазмы основан на измерении многомерных структурных функций q -го порядка для фазовых флуктуаций принимаемых сигналов при небольшом временном разнесении τ (ср. (Алимов и др., 2008а)):

$$\langle [\Delta S(\tau)]^q \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T [S(t+\tau) - S(t)]^q dt \propto \tau^{\varphi_S(q)} \propto \tau^{\beta_q \cdot q + 1 - D_S(\beta_q)}, \quad (1)$$

где T – временной интервал записи амплитуды сигнала; $\varphi_S(q)$ – показатель скейлинга при аппроксимации измеряемых структурных функций $\langle |\Delta S(\tau)|^q \rangle$ фазовых флуктуаций q -го порядка; $D_S(\beta_q)$ – фрактальная размерность фазовых флуктуаций принимаемых сигналов, определяемая на множестве q структурных функций:

$$\begin{cases} D_S(\beta_q) = \beta_q \cdot q + 1 - \varphi_S(q) \\ \beta_q = \frac{d\varphi_S(q)}{dq} \end{cases} . \quad (2)$$

Используя соотношения (1) и (2), можно получить информацию о мультифрактальном спектре $D_S(\beta_q)$ фазовых флуктуаций принимаемого сигнала.

Соотношения (1) и (2) являются следствием того, что, как известно, флуктуации фазы радиоволны, прошедшей толстый слой L ($L \gg l$) ионосферы или космической плазмы

с неоднородностями, размеры которых $l \geq \sqrt{\frac{L}{k}}$; имеют нормальное распределение (Алимов, Рахлин, 2005а). При этом плотность распределения разности фазовых флуктуаций $\Delta S(\tau)$ для принимаемых сигналов от ИСЗ на небольших временных интервалах разнесения можно полагать нормальной (Алимов, Рахлин, 2005а; Левин, 1969; Гершман и др., 1984; Татарский, 1967):

$$w(\Delta S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_S^2}} \exp\left(-\frac{(\Delta S)^2}{2\sigma_S^2}\right), \quad (3)$$

где $\sigma_S(\tau) = \sqrt{[\Delta S(\tau)]^2} = \sqrt{D_S(\tau)}$ – среднеквадратичное значение разности фазовых флуктуаций с разнесением τ на интервале стационарности $T_{стат}$ записи сигнала; $D_S(\tau)$ – структурная функция флуктуаций фазы 2-го порядка на выходе ионосферного или космического слоя плазмы (Левин, 1969; Гершман и др., 1984).

Тогда на интервале стационарности фазовых флуктуаций при $q \geq 0$ будет приближенно выполняться:

$$\overline{|\Delta S|^q} = \int_{-\infty}^{\infty} |\Delta S|^q w(\Delta S) d(\Delta S) \propto \sigma_S^q(\tau). \quad (4)$$

Как известно, для сравнительно небольших τ , возможна аппроксимация структурной функции 2-го порядка (Татарский, 1967):

$$\overline{|\Delta S|^2} \propto \tau^{2\beta}, \quad (5)$$

где 2β – показатель структурной функции, вообще говоря, различный на различных временных участках записи фазы сигнала длительностью $T_{стат}$

Соответственно, для структурной функции q -го порядка на полном временном интервале обработки $T \gg T_{стат}$ имеем (ср. (Алимов и др., 2008а)):

$$\langle |\Delta S(\tau)|^q \rangle \propto \int \tau^{\beta q} \tau^{1-D_S(\beta)} d\beta, \quad (6)$$

где $D_s(\beta)$ – фрактальная размерность записи фазы сигнала на локальном интервале стационарности $T_{\text{стац}}$. Оценка этого интеграла в выражении (6) на основе метода наименьшего спуска при малых β приводит нас к соотношениям (1), (2).

Методика обработки записей разности фаз на приведенной частоте для принимаемых когерентных сигналов ИСЗ фактически повторяет соответствующую методику обработки записей амплитуды в амплитудном методе исследований мультифрактальной структуры ионосферной плазмы (Алимов и др., 2007; 2008а; 2009а). При этом важно, что локальная структурная функция $[\Delta S(\tau)]^2$ как для слабых, так и для сильных амплитудных флуктуаций принимаемых сигналов будет пропорциональна соответствующей интегральной структурной функции 2-го порядка флуктуаций электронной концентрации (ср. (Алимов и др., 2009а; Левин, 1969; Гершман и др., 1984)):

$$\overline{[\Delta S(\tau)]^2} \propto \int_0^L \int_0^L \left(\overline{[\Delta N(\vec{r})]_q^2} - \overline{[\Delta N(0, l_2 - l_1)]_q^2} \right) dl_1 dl_2. \quad (7)$$

Здесь $r = \sqrt{r_x^2 + (l_2 - l_1)^2}$, $r_x = v\tau$, – пространственное разнесение точек наблюдения вдоль направления движения дифракционной картины со скоростью v в проекции на Землю; L – толщина слоя вдоль луча зрения на ИСЗ; l_1 и l_2 – текущие значения координаты вдоль луча зрения.

Локальную структуру турбулентности околоземной или космической плазмы с относительно крупномасштабными неоднородностями электронной концентрации можно охарактеризовать квазиизотропным трехмерным спектром флуктуаций электронной концентрации (Алимов и др., 2009а):

$$\Phi_{N_q}(\vec{k}) \propto k^{-p_3 q}. \quad (8)$$

При этом $p_3 q$ (показатель спектра неоднородностей для q -ой компоненты мультистепенного спектра турбулентности) может быть определен из соответствующего соотношения (Алимов и др., 2009а):

$$p_3 q = 2 + 2\beta_q \quad (9)$$

Неравномерное распределение в пространстве плазменных неоднородностей в общем случае характеризуется набором фрактальных размерностей $D_N(\beta_q)$, которые связаны с измеряемыми фрактальными размерностями флуктуаций фазы принимаемого сигнала $D_S(\beta_q)$ соотношением (ср. (Алимов и др., 2009а)):

$$D_N(\beta_q) = 2 + D_S(\beta_q) \quad (10)$$

Таким образом, полный мультифрактальный анализ записей флуктуаций фаз принимаемых сигналов позволяет определить мультистепенной $p_3 q$ и обобщенный мультифрактальный $D_N(p_3 q)$ спектры плазменных неоднородностей в довольно широком инерционном интервале турбулентности по результатам дистанционного когерентного зондирования ионосферной плазмы.

В случае мелкомасштабной искусственной ионосферной турбулентности (МИИТ) на средних широтах, возникающей при воздействии на ионосферу мощным КВ радиоизлучением, ее локальную структуру можно охарактеризовать трехмерным анизотропным спектром флуктуаций электронной концентрации в форме (ср. (Алимов и др., 2007)):

$$\Phi_{N_q}(\vec{k}) \propto k_{\perp}^{-p2_q} \cdot \Phi_{N_q}(k_{\parallel}), \quad (11)$$

где $p2_q$ – показатель q -ой компоненты мультистепенного спектра МИИТ в поперечной к направлению магнитного поля Земли плоскости.

Показатель мультистепенного спектра локальной мелкомасштабной искусственной ионосферной турбулентности поперек магнитного поля Земли может быть определен выражением (Алимов и др., 2007; 2009а):

$$p2_q = 1 + 2\beta_q \quad (12)$$

Таким образом, изотропная локальная структура МИИТ в плоскости поперек магнитного поля Земли, описываемая первым множителем в анизотропном спектре $\Phi_{N_q}(\vec{k})$ (см. (11)), однозначно определяется набором соответствующих гельдеровских экспонент β_q из мультифрактального спектра фазовых флуктуаций принимаемых от орбитальных ИСЗ сигналов после радиопросвечивания ими среднеширотной ионосферы во время воздействия на нее мощным коротковолновым радиоизлучением. Значения этих экспонент β_q определяются в ходе мультифрактальной обработки сигналов (см. (1), (2) и (Алимов и др., 2007; 2008а)).

Заметим, что в случае анизотропного спектра (11) для локальной структуры мелкомасштабной искусственной ионосферной турбулентности, следуя (Алимов и др., 2007), несложно получить простое соотношение, связывающее фрактальные размерности $D_N(\beta_q)$ пространства, занятого неоднородностями МИИТ, с фрактальными размерностями флуктуаций фазы $D_S(\beta_q)$ (ср. (Алимов и др., 2007)):

$$D_N(\beta_q) = \frac{3}{2}[1 + D_S(\beta_q)]. \quad (13)$$

Параметры β_q и показатели $p2_q$ мультистепенного спектра мелкомасштабной искусственной ионосферной турбулентности удовлетворяют соотношению (12), а, следовательно, измеряемый на эксперименте мультифрактальный спектр фазовых флуктуаций принимаемых сигналов $D_S(\beta_q)$ в условиях модификации ионосферы мощным КВ радиоизлучением будет характеризовать неравномерное распределение в пространстве искусственных мелкомасштабных неоднородностей для разных турбулентных структур с различными показателями $p2_q$ мультистепенного спектра.

Результаты применения разработанной методики

В работе (Мясников, Муравьева, 2007) приводятся результаты обработки сигналов ИСЗ, принятых в трех территориально разнесенных приемных пунктах Арья, Сеченово и Васильсурск. Показано, что только в пункте Арья, когда трансionoсферный сигнал распространялся вдоль геомагнитных силовых линий в условиях искусственно возмущенной ионосферы, наблюдались значительные изменения показателя спектра амплитудных мерцаний. В этой статье представлены результаты, полученные 20 августа 2002 года для сеанса связи с ИСЗ 22:40:40 – 22:47:20 UT (спутник двигался по траектории с севера на юг), когда нагревный стенд СУРА излучал на частоте ниже критической F-слоя с наклоном диаграммы направленности 8° на юг. Позднее исходные данные этого сеанса использовались в работах (Алимов и др., 2008б; 2009а) для анализа мультифрактальной структуры развитой ис-

кусственной ионосферной турбулентности. При этом использовались только восстановленные по квадратурным элементам значения амплитуды сигнала на частоте 150 МГц. Данные о разности фаз сигналов детально не анализировались. Ниже представлены отдельные результаты мультифрактальной обработки фазоразностных сигналов для этого же сеанса связи с ИСЗ в приемном пункте Арья.

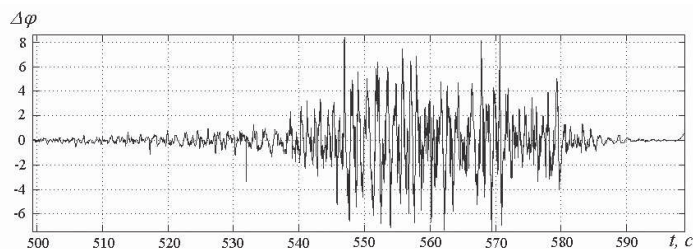


Рис. 1. Пример записи детрендированной разности фаз с 500 по 600 секунды

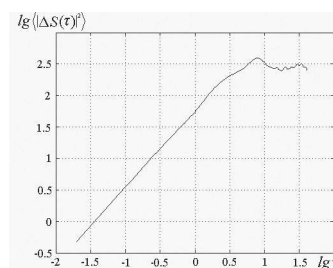


Рис.2. График структурной функции 2-го порядка

На рис.1 приведен пример записи детрендированной разности фаз с 500 по 600 секунды (см. (Мясников, Муравьева, 2007), рис.1). На рис.2 приведена соответствующая этой записи сигнала структурная функция 2-го порядка $lg\langle|\Delta S(\tau)|^2\rangle$ для интервала 520 – 600 с. Она имеет линейный участок (в логарифмическом масштабе) на сравнительно большом интервале временных значений τ ($0,03 \leq \tau \leq 3$ с.). Именно в окрестности этих линейных участков при аппроксимации многомерных структурных функций $\langle|\Delta S(\tau)|^q\rangle$ согласно соотношения (1) определялись зависимости скейлинговых функций $\varphi S(q)$ для различных параметров q ($q=1, 2, \dots, 20$).

Соответствующие зависимости мультистепенных спектров p_{2q} и обобщенных мультифрактальных $D_N(p_{2q})$ спектров ионосферной турбулентности, вычисленных по формулам (12), (13) с учетом расчетов мультифрактальных спектров фазовых флуктуаций принимаемых сигналов $D_S(\beta_q)$ и гельдеровских экспонент β_q из соотношения (2), представлены на рис. 3 и 4. Из рис. 3 следует, что истинные значения показателей мультистепенного спектра ионосферной турбулентности во время этого эксперимента были в пределах $1,96 \leq p_{2q} \leq 2,26$. А неравномерное распределение в пространстве анизотропных ионосферных неоднородностей характеризуется обобщенным мультифрактальным спектром $D_N(p_{2q})$. При этом его значения заметно варьируются уже при очень незначительных изменениях показателя p_{2q} мультистепенного спектра ионосферной турбулентности (см. рис.4). Необходимо отметить, что обобщенный мультифрактальный спектр $D_N(p_{2q})$, определенный по результатам этого же эксперимента (Алимов и др., 2009а) с использованием метода структурных функций флуктуаций амплитуды оказался значительно шире ($1,3 \leq p_{2q} \leq 2,2$).

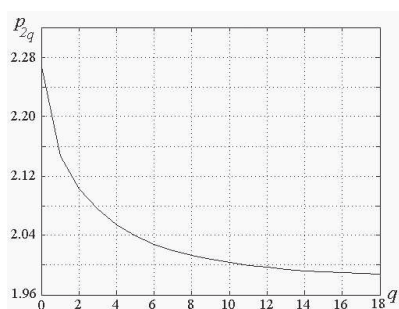


Рис.3. График мультистепенного спектра ионосферной турбулентности p_{2q}

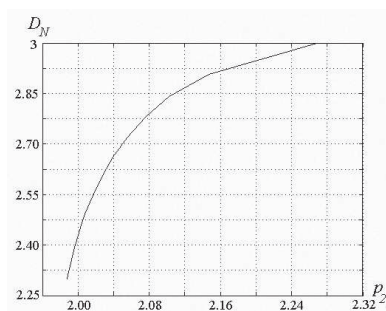


Рис.4. График обобщенного мультифрактального спектра $D_N(p_{2q})$

С другой стороны, диапазон изменений показателя спектра мощности флуктуаций амплитуды по данным (Мясников, Муравьева, 2007) для интервала обработки составил от 0,7 до 2,8 для десятисекундных фрагментов, тогда как показатель спектра мощности флуктуаций фазы практически не зависел от их длительности и лежал в диапазоне значений 2,12 – 2,17. Пример спектра мощности флуктуаций фазы для интервала 520 – 600 секунды записи приведен на рис. 5. Аппроксимация фазовых спектров проводилась методом наименьших квадратов для интервала частот от 1 до 10 Гц. Интересно, что быстрые сильные фазовые флуктуации наблюдались только с 540 по 580 секунду записи и носили симметричный относительно 560 секунды характер, тогда как амплитудные флуктуации плавно нарастали с 510 секунды. По уточненным данным (Мясников, Муравьева, 2007) время прохождения радиолучом направления магнитного зенита в этом сеансе равнялось 565 секунде записи. Вид обобщенного мультифрактального спектра $D_N(p_2)$ для фазового метода практически не менялся для интервалов 540 – 580 и 550 – 570 секунды записи. Это свидетельствует в пользу того, что сильные фазовые флуктуации здесь вызваны неоднородностями электронной концентрации, связанными с эффектом магнитного зенита. Диапазон углов, где наблюдалось значительное усиление быстрых фазовых мерцаний был не более 7° от направления магнитного зенита. Детальный анализ фазовых записей показал, что до 540 секунды записи наблюдались слабые фазовые флуктуации, природа которых (как и флуктуаций амплитуды, см. (Алимов и др., 2009б)), по-видимому, связана с конвективными неоднородностями, возникающими над возмущенной мощным КВ излучением областью ионосферы.

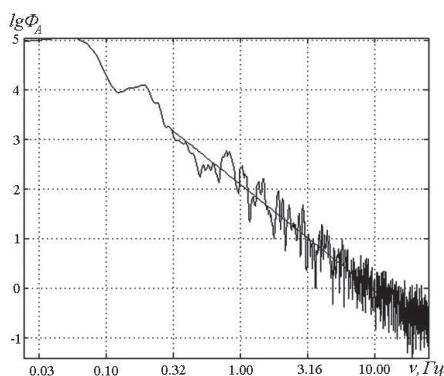


Рис.5. Спектр мощности флуктуаций фазы сигнала

Заключение

В работе рассмотрены особенности применения фазового метода для исследования мультифрактальной структуры ионосферы. Представлены результаты мультифрактальной обработки записи сигнала ИСЗ для случая сильных искусственных ионосферных возмущений, Проведена их предварительная интерпретация. Показано, что новое направление в исследованиях неоднородной структуры электронной концентрации верхней ионосферы – изучение фрактальной структуры ионосферной турбулентности, несомненно, окажется полезным для понимания физических процессов, лежащих в основе такого сложного явления как ионосферная турбулентность.

Авторы благодарны Е.Н. Мясникову за предоставление экспериментальных данных.

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

Литература

1. Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Мясников Е.Н., Рахлин А.В. (2008а) О фрактальной структуре искусственной ионосферной турбулентности // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2008. Т. 51. № 11. С. 970-976.
2. Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Мясников Е.Н., Фролов В.Л., Рахлин А.В. (2009а) Эффект магнитного зенита и некоторые особенности мультифрактальной структуры мелкомасштабной искусственной ионосферной турбулентности // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 9. С. 679-689.
3. Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Рахлин А.В. (2007) О фрактальных свойствах мелкомасштабных ионосферных неоднородностей // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2007. Т. 50. № 4. С. 300-308.
4. Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Рахлин А.В. (2008б) О некоторых особенностях фрактальной структуры развитой мелкомасштабной ионосферной турбулентности // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2008. Т. 51. № 4. С. 287-294.
5. Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Рахлин А.В. (2009б) О мультистепенном спектре мелкомасштабной ионосферной турбулентности // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 1. С. 14-22.
6. Алимов В.А., Рахлин А.В. (2005а) Фазовые флуктуации радиоволн в режиме насыщенных мерцаний // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2005. Т. 48. № 4. С. 275-282.
7. Алимов В.А., Рахлин А.В. (2005б) О фазовых флуктуациях радиоволн за турбулентным фазовым экраном // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2005. Т. 48. № 7. С. 563-573.
8. Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. (1984) Волновые явления в ионосфере и космической плазме. – М.: Наука, 1984. 392 с.
9. Левин Б.Р. (1969) Теоретические основы статистической радиотехники. Т.1. – М.: Сов. Радио. 1969. 752 с.
10. Мясников Е.Н., Муравьева Н.В. (2007) Характеристики пространственного спектра неоднородностей плазмы, возбуждаемых на средних широтах мощным стендом "СУРА" // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2007. Т. 50. № 8. С. 722-730.
11. Татарский В.И. (1967) Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967. 548 с.
12. Яковлев О.И. (1998) Космическая радиофизика. – М.: Научная книга, 1998. 432 с.

The phase method for the investigation of the fractal ionospheric turbulence structure

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

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

The peculiarity of the phase method for the investigation of the multifractal turbulence ionospheric structure was examined. Its base is measurement of the multidimensional structure functions of q power for phase fluctuations of artificial satellite signals. The results of the multifractal processing for signals from the artificial navigation satellite received on the earth for the time of strong artificial ionospheric disturbances by hearing SURFA facilities are given.

Key words: ionosphere, ionosphere turbulence, radio waves, phase fluctuations, small-scale irregularities, structure functions, multifractal structure.