

В.А. Алимов, Ф.И. Выборнов, А.В. Рахлин
ФГБНУ «НИРФИ»

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ МЕТОДАМИ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА

С целью изучения фрактальной структуры плазменной турбулентности перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) на средних широтах в 2004–2006 гг. в спокойных геофизических условиях (K_p -индекс был равен 1–2) в Нижегородской области проведен цикл наблюдений за сигналами ИСЗ системы «Парус» на частоте 150 МГц. В этих экспериментах большое внимание было уделено исследованиям мультифрактальной структуры перемежаемости ионосферной турбулентности, которая является одним из важнейших свойств турбулентности. Различные аспекты перемежаемости (и, прежде всего, резко выраженная пространственная неоднородность турбулентности) проявляются при мультифрактальных исследованиях структуры флуктуаций волновых процессов в турбулентной среде. Мультифрактальная структура перемежаемости, присущая развитой гидродинамической турбулентности, довольно интенсивно исследовалась в целом ряде работ (см., например, [1, 2]). Вместе с тем, до сих пор исследования мультифрактальной структуры перемежаемости турбулентных флуктуаций электронной концентрации в ионосферной плазме не проводились.

Фрактальная структура мелкокомасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ)

В основе мультифрактальной обработки амплитудных записей принимаемых сигналов искусственных спутников Земли (ИСЗ) лежит следующее определение обобщенной функции $S_{A_q}(\tau)$ для временных флуктуаций амплитуды $\Delta A(t)$ [3]:

$$S_{A_q}(\tau) = \sum_{i=1}^{N(\tau)} \left[\sum_{j=1}^{\tau} (\Delta A)_{ij}^2 \right]^q. \quad (1)$$

Здесь внутренняя сумма пропорциональна оценке средней мощности амплитудных флуктуаций принимаемых сигналов ИСЗ на временном интервале τ , а число $N(\tau)$ во внешней сумме – число интервалов длиной τ в анализируемой амплитудной записи принимаемого сигнала, q – показатель степени ($q = 0; \pm 1; \pm 2 \dots \pm n$); i, j – индексы на временной оси t , соответствующие отсчетам величины $\Delta A(t_{i,j})$ внутри данного интервала τ и для разных интервалов внутри полной записи длиной T_3 .

Будем исходить из того, что для амплитудных флуктуаций принимаемого сигнала применима известная мультифрактальная модель [1, 2], где предполагается, что реализация процесса $\Delta A(t)$ состоит из совокупности фрактальных множеств точек разных размерностей $D_A(\alpha)$. Вблизи каждой точки любого из этих множеств для средней мощности амплитудных флуктуаций $(\Delta A)^2$ на интервале τ выполняется следующий скейлинговый закон:

$$\frac{1}{\tau} \left[\sum_{i=1}^{\tau} (\Delta A)_{ij}^2 \right] \propto \tau^{\alpha-1}, \quad (2)$$

где α – показатель скейлинга. Тогда для искомой обобщенной функции $S_{A_q}(\tau)$, с

учетом того, что величина $N(\tau) \propto \tau^{-D_A(\alpha)}$ [3, 4], справедливо следующее приближенное соотношение (см. [1, 2]):

$$S_{A_q}(\tau) \propto \tau^{-D_A(\alpha)+\alpha q} \propto \tau^{\varphi(q)}, \quad (3)$$

где $\varphi(q)$ – степенной показатель скейлинга для измеряемой в эксперименте обобщенной функции $S_{A_q}(\tau)$ при малых значениях величины τ . При этом τ должна быть больше характерного радиуса временной корреляции $\tau_{\text{корр}}$ амплитудных флуктуаций принимаемых сигналов, а длина записи $T_3 \gg \tau$.

Из соотношения (3) следует, что:

$$\begin{cases} D_A(\alpha) = \alpha q - \varphi(q) \\ \alpha = d\varphi(q) / dq \end{cases} \quad (4)$$

Для определения мультифрактальной структуры перемежаемости ионосферной турбулентности выбирались отдельные фрагменты записи с амплитудными флуктуациями принимаемых сигналов длиной $N=8192$ отсчетов с частотой $\nu_0=95$ Гц (длительность фрагмента записи $T_3 \approx 86$ сек). Характерная длительность радиуса амплитудных флуктуаций, определяемая по частотным спектрам амплитудных флуктуаций принимаемых сигналов, как правило, составляла $\tau_{\text{корр}} \approx \nu_{\text{корр}}^{-1} \approx (1 \div 2)$ с (длина интервала $\tau_{\text{корр}}$ соответствует $(1-2) \cdot 10^2$ отсчетам). Так что необходимое условие $T_3 \gg \tau_{\text{корр}}$ было выполнено с хорошим приближением. Проанализировано около 50 фрагментов амплитудных записей принимаемых сигналов для разных сеансов связи с орбитальными ИСЗ в 2004–2006 гг.

На рис. 1 представлены типичные мультифрактальные спектры амплитудных флуктуаций принимаемых сигналов для различных сеансов связи с орбитальными ИСЗ в июне 2004, в августе 2005, и марте 2006 гг. Мультифрактальные спектры для самых различных сеансов связи с ИСЗ обладают хорошим подобием. Отличаются они друг от друга лишь в деталях: ширина спектров варьируется в пределах $1,2 \leq \Delta\alpha \leq 1,6$, а положение максимума размерностей в спектре $\alpha_\chi - 1,1 \leq \alpha_\chi \leq 1,3$ (висят от τ).

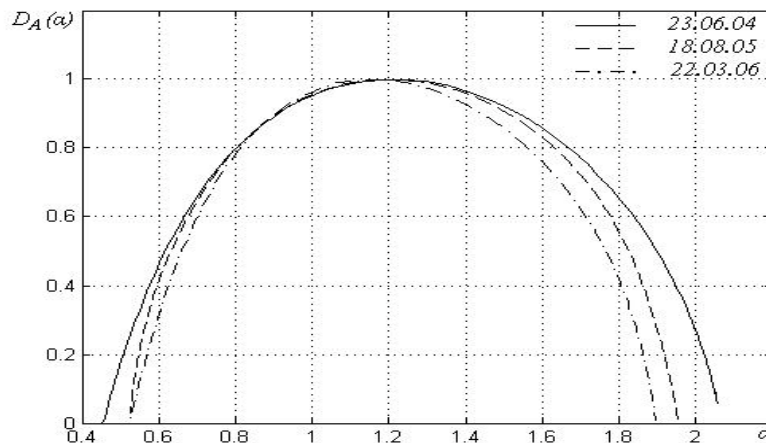


Рис. 1. Графики мультифрактальных спектров флуктуаций амплитуды сигналов ИСЗ

Заметим, что при уменьшении длины фрагмента амплитудной записи от $N = 8192$ отсчетов до $N = 1024$, измеряемые мультифрактальные спектры практически не менялись. Следует указать также, что в точках, для которых выполнено равенство $D_A(\alpha) = \alpha$, в соответствии с (3) справедливо выражение $\varphi(q) = \alpha \cdot (q - 1)$. При этом очевидно, что средние значения мощности амплитудных флуктуаций принимаемых сигналов на интервале наблюдения T_3 (см. (1) – (3) при $q = 1$) стационарны (и не зависят от τ).

В условиях эксперимента 2004 г. величина параметра M (число квазисинусоидальных волн в структуре ПИВ, определяемых методом корреляционного интеграла [4]) составляла 4–5, а для экспериментов в 2005 – 2006 гг. 5–6. Именно при нелинейном «разрушении» этих нескольких крупномасштабных синусоид в квазирегулярной структуре электронной концентрации ПИВ, в конечном счете, и возникает наблюдаемый детерминированный хаос в принимаемом сигнале.

В экспериментах 2005–2006 гг. размерность амплитудной реализации D_{AK} , определяемая методом корреляционного интеграла, как правило, была большой ($D_{AK} \gg 1$). Это обстоятельство, в соответствии с концепцией Такенса [1, 2], свидетельствует в пользу того, что источник, порождающий наблюдаемый хаотический процесс, является случайным (подробнее см. [1, 2]). В нашем случае речь идет о том, что в экспериментах 2005 и 2006 гг., в отличие от эксперимента 2004 года, мелкомасштабная плазменная турбулентность ПИВ часто порождалась случайным источником, соответствующим многомерному набору квазисинусоидальных волн в крупномасштабной структуре ПИВ.

В экспериментах по радиопросвечиванию ионосферы сигналами орбитальных ИСЗ для модели изотропной мелкомасштабной ионосферной турбулентности фрактальная размерность $D_N(\alpha)$, определяемая соотношением (ср. [2])

$$D_N(\alpha) = 2 + D_A(\alpha), \quad (5)$$

будет характеризовать непосредственно искомую мультифрактальную меру перемежаемости флуктуаций электронной концентрации ионосферной плазмы. При этом для достаточно малых r доля полного объема, занятого фрактальными неоднородными структурами, $r^{3-D_N(\alpha)}$ (ср. [2]) стремится к нулю (см. (5)). А наибольшие локальные флуктуации электронной концентрации ионосферной плазмы, с учетом соотношения (2), происходят на фрактальных подпространствах с размерностью $D_N(\alpha < 1) < 3$. В рамках принятой мультифрактальной модели это означает, что флуктуации электронной концентрации ионосферной плазмы в пространстве имеют резко неравномерное распределение.

Заключение

По результатам наших экспериментов можно констатировать, что фрактальная структура мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации ПИВ с размерами $l \approx (1 \div 10)$ км имеет две особенности. Первая – эта структура в целом может быть порождена нелинейным «разрушением» нескольких крупномасштабных синусоид в квазирегулярной структуре ПИВ. В конечном счете, это явление нелинейного «разрушения» АГВ в ионосфере обуславливает наблюдаемый детерминированный хаос в принимаемых сигналах от орбитальных ИСЗ. В то же время, нарождающиеся при нелинейном «разрушении» АГВ в ионосфере мелкомасштабные неоднородности электронной концентрации неравномерно распределяются в пространстве. Так что эта, генерируемая распадом крупномасштабных квазирегулярных структур ПИВ, мелкомасштабная турбулентность обладает чрезвычайно большой неоднородностью – это вторая особенность. В данном случае перемежаемость проявляется в форме пространственной неоднородности ионосферной турбулентности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства промышленности и инноваций Нижегородской области (проект № 11-02-97012 р_поволжье_a).

Список литературы:

- [1] Зосимов В.В., Лямшев Л.М. Фракталы в волновых процессах // УФН. – 1995. – Т. 165, № 4. – С. 361–402.
- [2] Рабинович М.И., Сущик М.М. Регулярная и хаотическая динамика структур в течениях жидкости // УФН. – 1990. – Т.160, № 1. – С. 3–64.
- [3] Акимов В.Г., Зосимов В.В, Сушков А.Л. Мультифрактальная структура перемежаемости пристеночных турбулентных пульсаций давления при течении трубы // Акустический журнал. – 1992. – Т. 38, № 2. – С. 375–378.
- [4] Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. – М.: Университетская книга, 2005. – 848 с.

А.Ф. Беленов

ГБОУ ДПО «Нижегородский институт развития образования»

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЫ
«ЖИВАЯ ФИЗИКА» И ЦИФРОВОЙ ЛАБОРАТОРИИ
«АРХИМЕД» В ФИЗИЧЕСКОМ ОБРАЗОВАНИИ
СТУДЕНТОВ ИНЖЕНЕРНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ**

В данной статье рассмотрены образовательные возможности программного комплекса «Живая Физика» и цифровой лаборатории «Архимед» при обучении физике студентов инженерных специальностей.

1. Виртуальная среда Живая физика представляет собой готовые программы, в которых студенты могут проводить моделирование физических экспериментов. При помощи представленного в «лабораторном шкафу» оборудования и материалов возможно моделирование разнообразных процессов по таким темам как механика, электричество и магнетизм.

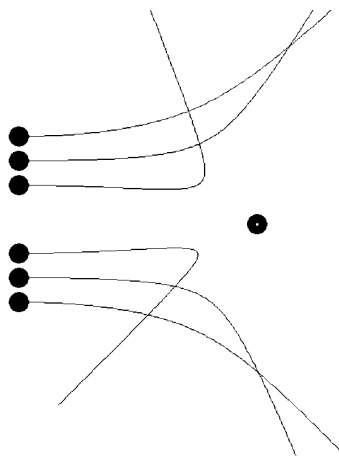


Рис. Фрагмент авторской анимации опыта Резерфорда

Современный вычислительный аппарат, средства анимации, многочисленные вспомогательные функции делают «Живую физику» удобным и мощным инструмен-