

## **Исследование динамической структуры турбулентных потоков с использованием регрессионных моделей**

С. Ф. Коломиец, Л. А. Луканина, А. Л. Гаврик

*Фрязинский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук,  
E-mail: bottom@mail.ru*

*Представлены результаты анализа нестационарных сигналов, характерных для радиопросвечивания солнечной короны с использованием регрессионных моделей по измерениям на разнесенных антеннах. Полученные оценки совпадают с имеющимися в литературе. Рассматриваемый подход позволяет более обоснованно подходить к выбору границ эффективного спектрального интервала регистрируемых сигналов, что критично при определении средней скорости движения потока.*

*The results of the signal analysis using the regression models of measurements with spaced antennas are presented. The obtained estimates coincide with those available in the literature. The considered approach makes it possible to more reasonably approach the choice of the boundaries of the effective spectral interval of the recorded signals, which is critical for determining the flow velocity.*

### **Введение**

На сегодняшний день мы не в состоянии теоретически прогнозировать поведение и развитие даже простейших турбулентных потоков, не обращаясь к экспериментальным данным о самом потоке. Предсказание поведения турбулентного потока осложняется еще и тем, что его фазовая траектория не является строго повторяемой, но может рассматриваться как предмет изучения лишь в статистическом смысле. Один и тот же процесс, рождённый при одинаковых граничных условиях, развивается по разным и пока неизвестным законам. Подобный характер эволюции турбулентных систем накладывает особые требования к сопоставлению экспериментальных и теоретических оценок, необходимых для дальнейшего развития наших представлений о ней. Помимо самих инструментов измерения, наиболее критичными факторами для сопоставления являются также методики первичной обработки данных.

подавляющее большинство инструментов, используемых для измерений в турбулентных потоках, формирует нестационарные временные последовательности экспериментальных данных. Такие сигналы регистрируются, например, на выходе датчиков давления и температуры, используемых в атмосфере и океане. Сигнал дисперсионного интерферометра, используемого для дистанционного исследования турбулентности космической плазмы также нестационарен.

Обработка нестационарных сигналов представляет определенные трудности. Большая их часть является следствием недостаточности или сложности теоретических представлений, требуемых для такой обработки. Упрощенные подходы в лучшем случае позволяют получать полуколичественные оценки, достоверность которых невысока. В отношении подобных сигналов разработка альтернативных способов оценки одной и той же величины достаточно актуальна в целях повышения достоверности получаемых оценок.

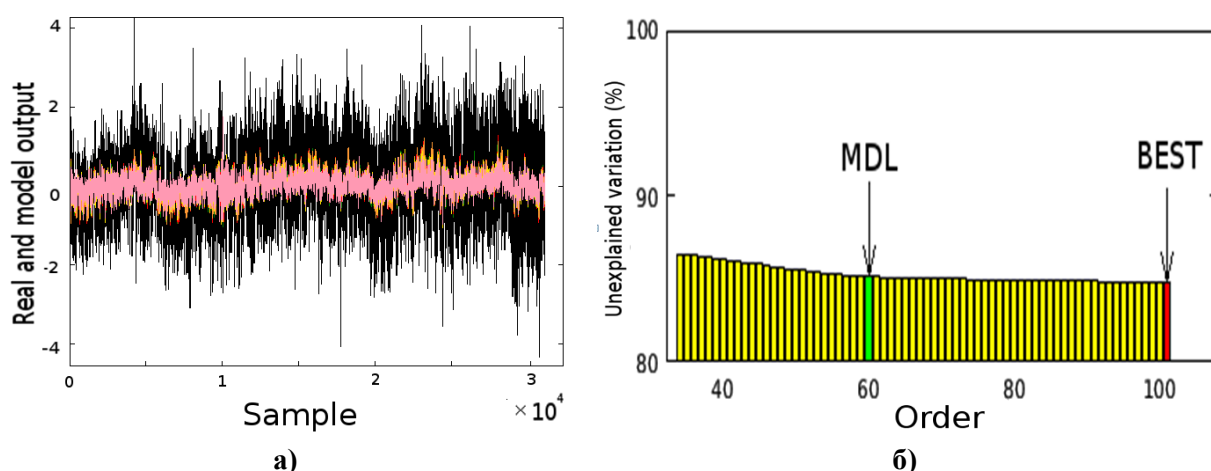
### **НЧ-фильтрация сигналов радиопросвечивания солнечной короны**

Один из основных подходов к обработке нестационарных процессов заключается в их сведении к квазистационарным с использованием низкочастотной фильтрации. Считая сложность выделения информационных участков спектра в шумах среды и

измерительного прибора общей проблемой обработки шумоподобных сигналов, к характерным недостаткам этого способа следует отнести влияние низкочастотной фильтрации на окончательные оценки и его узкую область применимости. Без эффективной коррекции указанных недостатков, ориентированной на возможность сопоставления данных, достаточно широкий круг измерительных инструментов остается фактически наблюдательными средствами.

Радиопросвечивание солнечной короны стало обязательным пунктом практически всех космических исследовательских программ. Этот метод позволяет проводить измерения параметров солнечной короны, не мешая выполнению основной задачи, даже если она не связана с изучением Солнца. Простотой получения данных объясняется наличие значительного экспериментального материала для статистической обработки.

Сигналы дисперсионного интерферометра допускают использование низкочастотной фильтрации, что открывает возможности использования корреляционных методов. Однако вышеописанные недостатки метода обработки сигналов и отсутствие возможности проведения непрерывных измерений с заданным разрешением в заранее заданной области пространства определило отношение к радиопросвечиванию в целом как к полуколичественному (наблюдательному) средству с соответствующими требованиями к интерпретации данных.



**Рис. 1. ARX-модель сигнала, получаемого с использованием дисперсионного интерферометра при просвечивании солнечной короны после НЧ-фильтрации:**  
**а) – реальный (темный) и модельный (светлый) сигналы с порядком полиномов от 10 до 80,**  
**б) – оценки эффективности моделей разных порядков**

Одним из основных параметров при измерениях в солнечной короне является скорость турбулентного потока плазмы. Разнесённый приём сигналов в двух приёмных пунктах позволяет оценивать последнюю количественно. По таким данным с использованием простейших методов определялось групповое время запаздывания (ГВЗ) при известном расстоянии между лучами [1]. Временные ряды флуктуаций скорости потока, определяемой по ГВЗ, позволили качественно оценить турбулентный режим соответствующих потоков [1, 2]. Массовый экспериментальный материал, обработанный таким образом, указывает на то, что однородным и изотропным режим турбулентности солнечного ветра можно считать лишь на расстояниях более 15-20 солнечных радиусов [3]. Однако, для изучения причин отклонения турбулентного режима от ожидаемого колмогоровского на близких к Солнцу расстояниях информационных возможностей простейших методов недостаточно. Возрастание

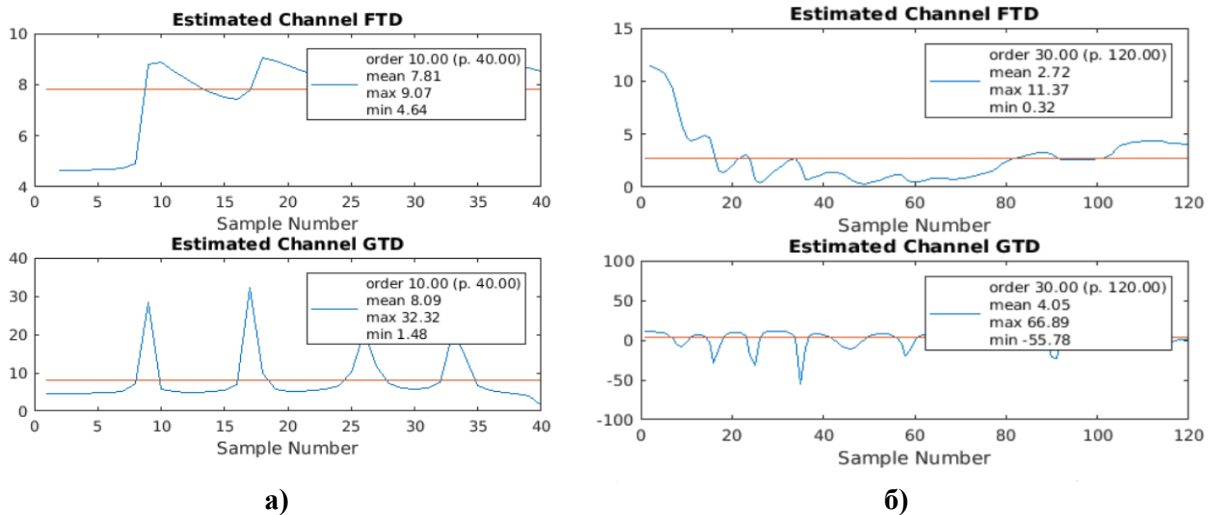
мощности шумов вблизи Солнца, требующее оперативного контроля границ “информационного интервала” спектра, а также возможное изменение динамической микроструктуры исследуемых потоков снижают достоверность оценок, полученных с использованием простой кросс-корреляции. Двухскоростные потоки, например, не могут быть использованы при оценке параметров турбулентности. Для некоторых сеансов даже незначительные изменения в условиях фильтрации данных приводят к значительным изменениям ГВЗ, определяемого по кросс-корреляционной функции.

Один из возможных способов оценки динамической структуры потока, являющийся также альтернативным методом оценки ГВЗ, состоит в проецировании экспериментальных данных на множество многочленов заданной степени с последующим аналитическим исследованием системы, передаточная характеристика которой задаётся соответствующим многочленом. Одной из важных особенностей предлагаемого подхода является возможность унифицированного выделения информационных участков спектра в шумах среды, допускающего эффективные сравнения различных экспериментальных данных. Сложность и субъективность их определения вносит ощутимые погрешности в определение наклона энергетического спектра, являющегося основным исследуемым показателем при оценке степени “колмогоровости” турбулентности солнечного ветра.

Регрессионные модели позволяют однозначно проецировать сигналы в область полиномов заданной степени. Подобный подход нашел широкое применение в спектральном анализе [4]. Особенно логично его использование в случае шумоподобных сигналов. При этом сигналы, полученные в двух точках среды, позволяют однозначно представить её модель полиномом заданной степени. Последний, с использованием известных зависимостей, исключая субъективный подход, позволяет оценивать фазовое и групповое время запаздывания. Немаловажно, что в случае исследования фазового запаздывания открывается возможность оценки динамической микроструктуры потока.

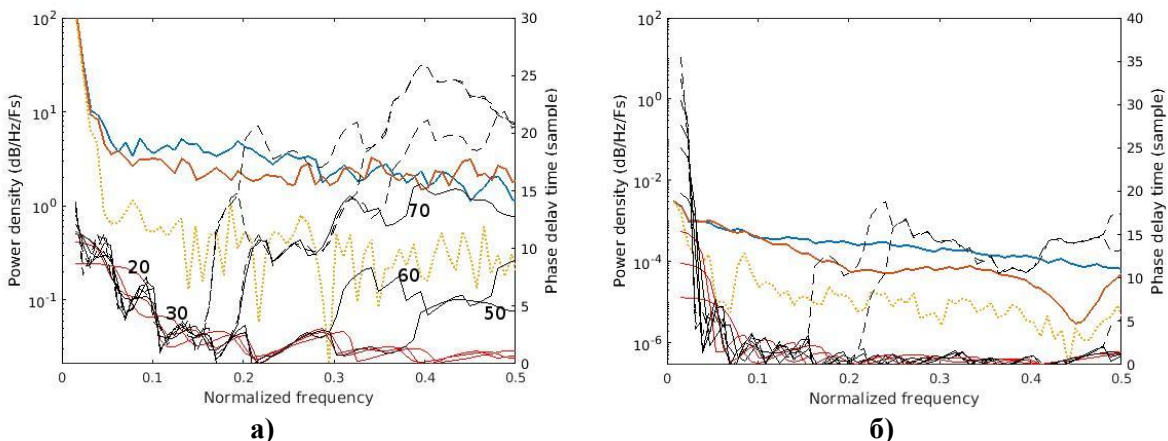
Выбор порядка модели является наиболее неоднозначным шагом рассматриваемой процедуры обработки данных. Существующие критерии выбора сформулированы, исходя из соображений вычислительной “стоимости” того количества информации о сигнале, которое содержится в модели. На Рис. 1б приведено положение одного из таких критериев (MDL) для модели, сигналы которой приведены на Рис. 1а. Как можно видеть на Рис. 2 – где приведены графики фазовых и групповых задержек при использовании полиномов разных степеней для моделирования одной и той же среды в одном и том же эксперименте – аналитические исследования динамических параметров модели требуют физически более ясных критериев, так как в одних и тех же условиях времена запаздывания могут значительно отличаться для моделей различных порядков.

С целью преодоления неоднозначности выбора правильного порядка модели на Рис. 3 приведены графики фазовой задержки на фоне спектров мощности в двух точках изменения вместе с их кросс-спектром. Слева хорошо видна область, в которой поведение графиков фазовой задержки качественно не меняется с ростом порядка модели.



**Рис. 2. Фазовое и групповое время задержки для моделей среды в одном и том же эксперименте, выражаемых полиномами различных степеней: а) – при использовании полинома 10 степени, б) – при использовании полинома 30 степени**

Графики на Рис. 3а получены для модели, сигналы и оптимальная оценка порядка которой приведены на Рис. 1. Видно, что оценка MDL указывает на возможность использования сигнала до значения нормализованной частоты, равного 0.3. Эта граница в два раза выше оценок, имеющихся в литературе [5].



**Рис. 3. Фазовое время задержки для моделей разного порядка (тонкие сплошные линии для порядков от 20 до 70 и тонкие штриховые линии для порядков 80, 90, 100) на фоне спектров мощности в двух точках (утолщенные сплошные линии) и их кросс-спектра (точки): а) – измерения угла вращения плоскости поляризации в проекте Helios (83DOY009), б) – Измерение с использованием интерферометра в проекте Galileo (96DOY360)**

## Выводы

Подход к обработке нестационарных данных, заключающийся в построении регрессионных моделей рассеивающей среды (например, ARX-модели) по данным измерений в двух точках позволяет более наглядно по сравнению с кросс-корреляционной функцией исследовать структуру сигнала и оценивать границы его эффективного спектрального диапазона. В частности, на параметрических семействах графиков фазовой задержки хорошо видны эффекты, возникающие у нуля

нормализованной частоты, являющиеся артефактом НЧ-фильтрации нестационарного сигнала, и в правой части графика, являющиеся следствием шума среды и аппаратуры.

Приведены результаты использования обсуждаемого подхода к реальным данным, полученным в экспериментах с KANHelios и Galileo. Полученные оценки границ эффективного спектрального диапазона и средней скорости движения потока совпадают с имеющимися в литературе при использовании моделей со степенью многочлена, лежащей в диапазоне от 60 до 80.

Форма графиков фазовой задержки указывает на критичность процедуры низкочастотной фильтрации и фильтрации высокочастотного шума для оценки средней скорости движения потока. Неправильный выбор пределов при проведении фильтрации может существенно изменять значение получаемого ГВЗ. В тоже время, рассматриваемый подход к обработке данных позволяет обоснованно выбирать указанные границы с целью формирования более достоверных оценок для последующих сравнений.

*Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0030-2019-0008.*

### **Литература**

1. Efimov A. I., et al. // Solar Physics. 2015. V. 290. P. 2397
2. Chashei I. V., et al. // Astron. & Astrophys. Transactions. 2007. V. 26. P. 611
3. Yakovlev O. I. and Pisanko Y. V. // Adv. Space Res. 2017. V. 61, P. 552
4. Дженкинс Г., Ватс Д. Спектральный анализ и его приложения. Вып. 1, 2. – Пер. с англ. – М: «Мир», 1972.
5. Ефимов А.И., Луканина Л.А., Самознаев Л.Н., Чашей И.В., Берд М.К., Плеттемейер Д. Анализ частотных флуктуаций радиоволн в околосолнечной плазме по данным космического аппарата GALILEO // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 7. С. 773-784.