СУПЕРСТАТИСТИКА ПОЗИЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ КОЛЛИМИРОВАННОГО ВОЛНОВОГО ПУЧКА НА ВЫХОДЕ АТМОСФЕРНОЙ ТРАССЫ

Бланк А.В., Сухарева Н.А.

Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

E-mail: blankarkadiy@physics.msu.ru, suhareva@phys.msu.ru

Предложены методы и методики анализа временных рядов вариации положения энергетического центра и профиля коллимированного волнового пучка на протяженной оптической трассе. Основываясь на суперстатистической модели, определены выражения для функций распределения величины дискретного дрейфа, проведено сопоставления вероятностных и спектральных характеристик наблюдаемого стохастического процесса. В отличие от суперстатистических приближений для вариации скорости аэродинамических потоков, дрейф энергетического центра описывается асимметричной функцией распределения по скорости смещения. Величина асимметрии пропорциональна ветровой нагрузке в интервале регистрации выборки. На основе анализа массива экспериментальных данных, собранных в апреле-мае 2019 года, связи функции распределения вероятности скорости дрейфа энергетического центра и частотного спектра предложены классы суперстатистических реализаций.

Суперстатистический подход к описанию физической системы основан на её "расщеплении" на фракции, каждая из которых обладает собственной шкалой времени, квазистационарным энергетическим распределением, может находиться в контакте с термостатом, но за счет флуктуаций внешних параметров сохраняет отличную от термостата собственную температуру. Типичные примеры подобных систем – атмосферные и гидросферные протяженные трассы, на которых существуют градиенты температур и конвективных потоков, создаваемые солнечной радиацией и глобальными течениями. При распространении по подобной трассе коллимированного пучка рефракционные флуктуации приводят к дрейфу его энергетического центра за счет вариации градиента оптической плотности, изменению линейных размеров за счет стохастических дефокусирующих преобразований. Правомерна задача восстановления суперстатистических свойств пройденного маршрута по статистическим характеристикам регистрируемого пространственно-временного распределения интенсивности. Для синтеза суперстатистической модели определяется параметр $\boldsymbol{\beta}$, статистика пространственно-временных флуктуаций которого описывается квазистационарной функцией распределения $f(\beta)$. В качестве параметра $\boldsymbol{\beta}$ в различных задачах могут быть выбраны обратная температура, химический потенциал, характеристики диссипации энергии в аэро- или гидродинамических потоках.

Описание суперстатистической системы основано на определении обобщенного фактора как функции внутренней энергии [1]:

$$B(E)=\int_0^{\infty} f(\beta)e^{-\beta E}. \qquad (1)$$

Реализуемые функции распределения по энергии или иному эквивалентному параметру могут быть получены непосредственно из распределения для обобщенного фактора в виде:

$$p(E)=\int_0^\infty f(\beta)\frac{1}{Z(\beta)}e^{-\beta E}d\beta, \quad (2)$$

здесь $Z(\beta)$ – нормирующая функция.

Простая динамическая реализация суперстатистики может быть построена путем рассмотрения стохастических дифференциальных уравнений с пространственно - временными флуктуирующими параметрами [2]. Например, запишем уравнение Ланжевена для положения энергетического центра коллимированного волнового пучка

$$\frac{d\vec{R}}{dt}=\gamma\vec{F}(\vec{R})+\hat{\sigma}\vec{N}(t), \quad (3)$$

$\vec{N}(t)$ - анизотропный гауссовский белый шум, γ > 0 - диссипационный коэффициент, $\hat{\sigma}$ мощность аддитивной помехи, $\vec{F}=-grad\,V(R)$ - стохастические воздействие, вызывающее мультипликативный дрейф. Маргинальное распределение по координатам составит:

$$p(\vec{R})=\int_0^\infty p(\vec{R}|\beta)f(\beta)d\beta. \quad (4)$$

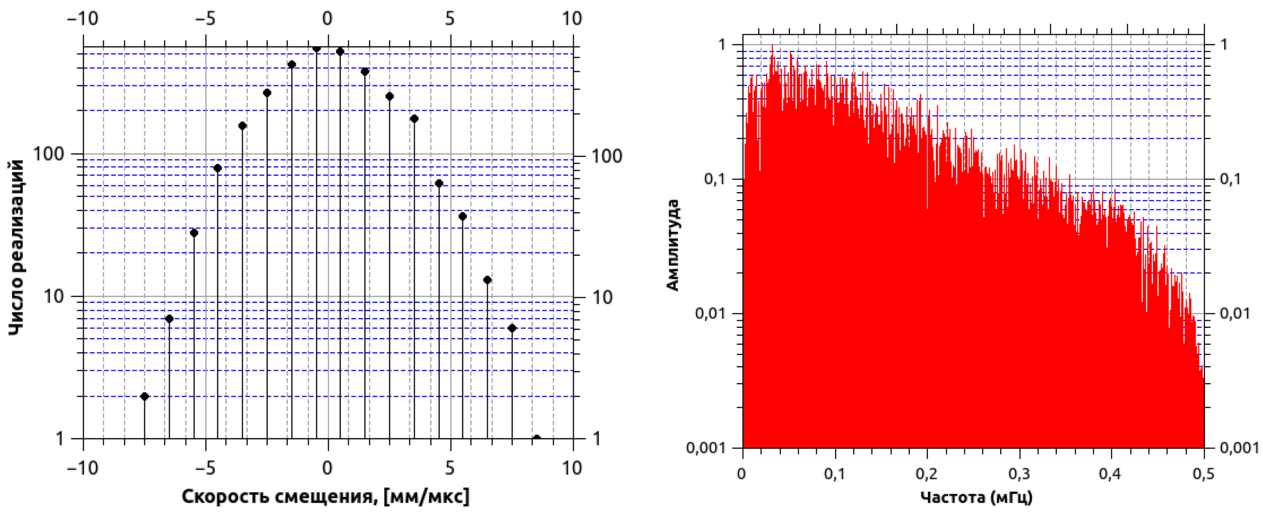
Наиболее используемо в суперстатистических моделях турбулентных течений логнормальное распределение для флуктуаций диссипации энергии β, задаваемое в виде [3]:

$$f(\beta)=\frac{1}{\beta s\sqrt{2\pi}}e^{\frac{-(log(\beta/\mu))^2}{2s^2}}, \quad (5)$$

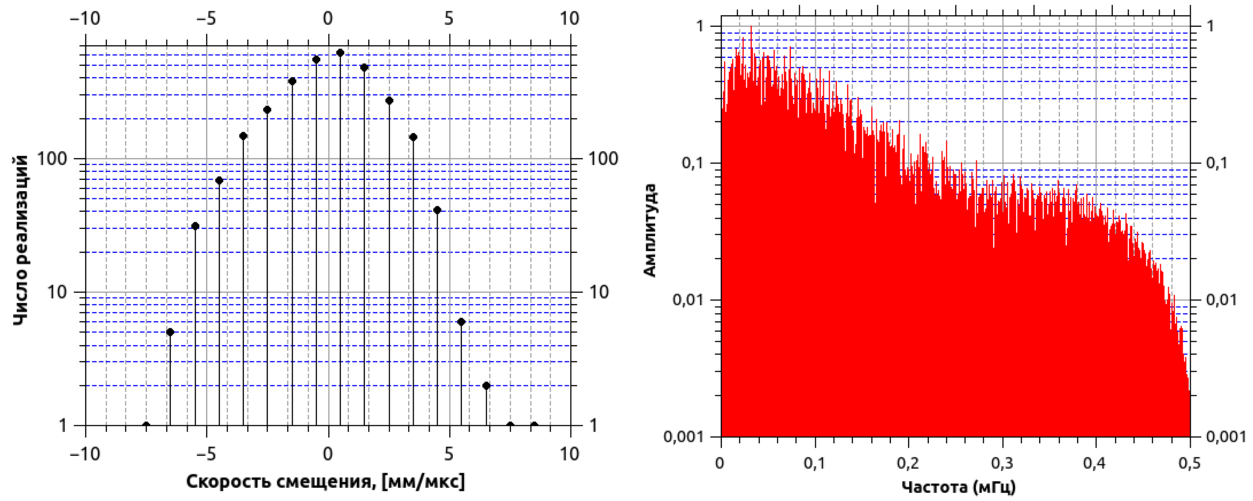
здесь μ и s - параметры. Исходя из структуры уравнений Ланжевена [4 – 9] можно определить функцию распределения для разности последовательных координат или для значений скорости дрейфа энергетического центра пучка:

$$p(u)=\frac{1}{2\pi s}\int_0^\infty \beta^{-1/2}e^{\frac{-(log(\beta/\mu))^2}{2s^2}}e^{(1/2)\beta u^2}d\beta. \quad (6)$$

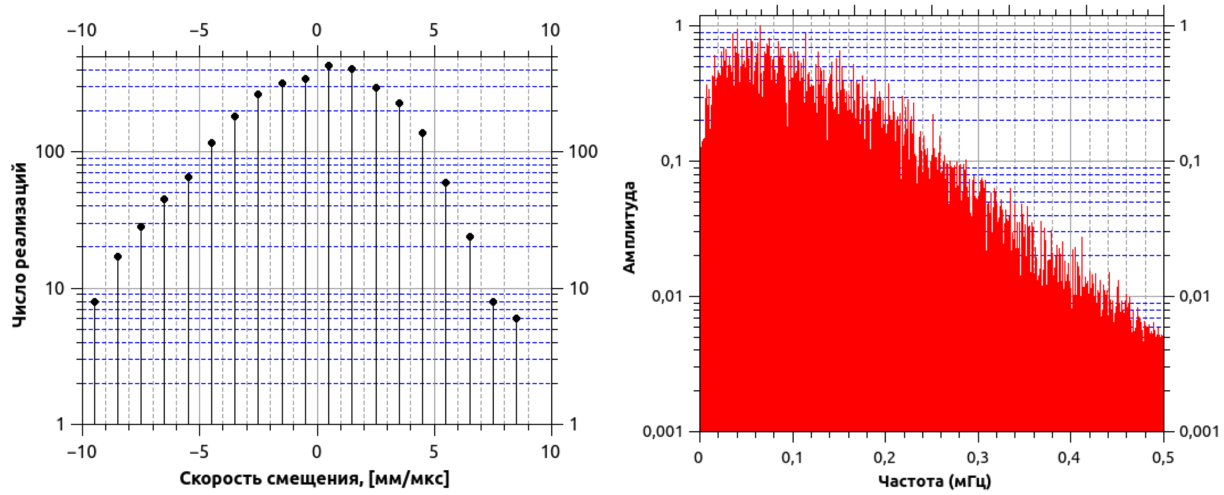
Записанное уравнение следует рассматривать лишь как гипотезу, справедливость которой необходимо обосновать в исследуемых режимах на протяженной оптической трассе.



09:30



13:04



16:43

Рис. 1: Типичные профили функций распределения для компонент вектора смещения и их частотных спектров для утренней, дневной и вечерней выборок

На Рис.1 представлены экспериментальные выборки статистических и спектральных характеристик горизонтального дрейфа энергетического центра пучка. Выборки были зарегистрированы на протяженной трассе длиной 1350 м, детально описанной в работах [10-11]. Перетяжка одномодового гауссова волнового пучка на длине волны 1064 нм размещалась в плоскости регистрации камеры технического зрения. Длительность отдельной серии составляла 3000 кадров или 3 секунды при частоте опроса 1000 Гц и времени экспозиции 5 мкс. Наблюдаемые зависимости позволяют контролировать модификацию функций распределения для обобщенного больцмановского фактора, классифицировать типы суперстатистических распределений позиционных характеристик.

1. Beck C., Cohen E. G. D. "Superstatistics" //Physica A: Statistical mechanics and its applications. – 2003. – Т. 322. – С. 267-275.
2. Beck C. "Dynamical foundations of nonextensive statistical mechanics" //Physical Review Letters. – 2001. – Т. 87. – №. 18. – С. 180601.
3. Beck C. "Superstatistics in hydrodynamic turbulence" // Physica D: Nonlinear Phenomena. – 2004. – Т. 193. – №. 1-4. – С. 195-207.
4. Hilgers A., Beck C. "Approach to Gaussian stochastic behavior for systems driven by deterministic chaotic forces" //Physical Review E. – 1999. – Т. 60. – №. 5. – С. 5385.
5. Reynolds A. M. "On the application of nonextensive statistics to Lagrangian turbulence" //Physics of Fluids. – 2003. – Т. 15. – №. 1. – С. L1-L4.
6. Beck C. "Lagrangian acceleration statistics in turbulent flows" //EPL (Europhysics Letters). – 2003. – Т. 64. – №. 2. – С. 151.
7. Dutton J. A., Thompson G. J., Deaven D. G. "The probabilistic structure of clear air turbulence—Some observational results and implications" //Clear Air Turbulence and Its Detection. – Springer, Boston, MA. – 1969. – С. 183-206.
8. Marov, Mikhail Ya and Kolesnichenko, Aleksander V "Statistical Parameters of Turbulence: Modeling from Fluctuations of the Refractive Index" //Mechanics of Turbulence of Multicomponent Gases). – 2001. – Pp. 270–307.
9. Marov M. Y., Kolesnichenko A. V. "Statistical Parameters of Turbulence: Modeling from Fluctuations of the Refractive Index" //Mechanics of Turbulence of Multicomponent Gases. – 2001. – С. 270-307.
10. Matsak I. S. et al. "Super narrow beam shaping system for remote power supply at long atmospheric paths" //Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XIX. – International Society for Optics and Photonics.2017. – Т. 10090. – С. 100900U.
11. Babanin E. A. et al. "Positional characteristics of generalized decentered elliptical Gaussian beams propagating through extended atmospheric paths" //2017 Days on Diffraction (DD). – IEEE, 2017. – С. 24-30.