Негауссова статистика экстремальных событий в вынужденном комбинационном рассеянии

Операции

Гауссовы операции

Описываются гамильтонианом не выше второй степени.

Негауссовы операции

Описываются гамильтонианом третьей степени и выше.

Состояния

Гауссовы состояния

Полностью характеризоваться первым и вторым моментами квадратурных операторов.

Негауссовы состояния

“Классические” негауссовы состояния

Могут быть подготовлены путем применения комбинации гауссовских операций.

Квантовые негауссовы состояния

Для их приготовления обязательно наличие негауссовой операции.

Yashar E. Monfared and Sergey A. Ponomarenko,
Non-Gaussian statistics of extreme events in stimulated Raman scattering: The role of coherentmemory and source noise,
PHYS. REV. A **96**, 043817 (2017).

Теоретическая модель

Система уравнений, описывающая вынужденное комбинационное рассеяние, для безразмерных величин

$$\partial_Z \mathcal{E}_p = i\kappa\sigma\mathcal{E}_s,$$
$$\partial_Z \mathcal{E}_s = i\kappa^{-1}\sigma^*\mathcal{E}_p,$$
$$\partial_T \sigma = -\Gamma\sigma + i\mathcal{E}_p\mathcal{E}_s^*. \qquad \kappa = \sqrt{\omega_p n_s/\omega_s n_p}$$

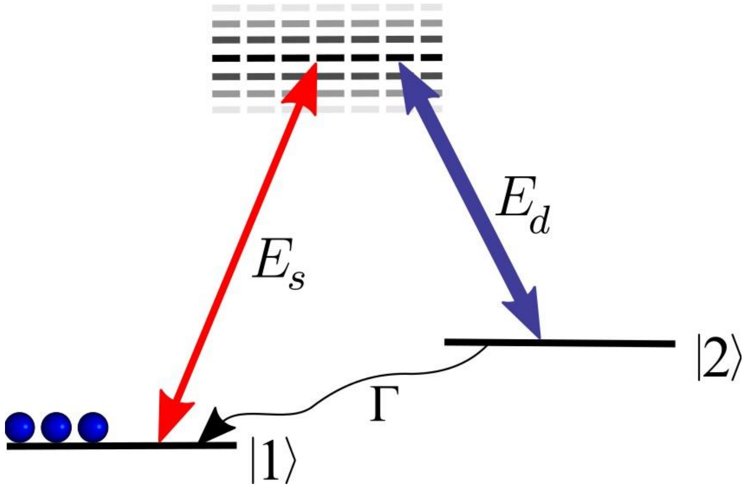
Безразмерные величины

$$Z = z/L_{\mathrm{SRS}} \qquad T = \tau/T_{\mathrm{SRS}}$$

$$E_p = \sqrt{2I_{p0}/\epsilon_0 c n_p}\mathcal{E}_p \qquad E_s = \sqrt{2I_{p0}/\epsilon_0 c n_p}\mathcal{E}_s$$

Характерная длина и время вынужденного комбинационного рассеяния

$$L_{\mathrm{SRS}} = \left(\frac{2\epsilon_0 c}{N r_{\mathrm{eff}}}\right)\sqrt{\frac{n_p n_s}{\omega_p \omega_s}} \qquad T_{\mathrm{SRS}} = \left(\frac{2\hbar\epsilon_0 c n_p}{r_{\mathrm{eff}}\langle I_{p0}\rangle}\right)$$



Система уровней атома

Входные импульсы и их статистика

Входной импульс накачки состоит из когерентной гауссовой и случайной компонент

$$\mathcal{E}_p(T,0) = e^{-(T-T_0)^2/2T_*^2} + \Delta\mathcal{E}_p(T)$$

Входной стоксов импульс

$$\mathcal{E}_s(T,0) = \sqrt{\frac{n_p P_s}{n_s P_p}}\, e^{-(T-T_0)^2/2T_*^2}$$

Корреляционная функция случайной компоненты имеет гауссов спектр

$$\langle \Delta\mathcal{E}_p^*(T_1,0)\Delta\mathcal{E}_p(T_2,0)\rangle = \left(\frac{\Delta P_p}{P_p}\right)\exp\left[-\frac{(T_1-T_0)^2+(T_2-T_0)^2}{2T_*^2}\right]\exp\left[-\frac{(T_1-T_2)^2}{2T_c^2}\right]$$

Интенсивность шумов подчиняется экспоненциальному закону

$$\mathcal{P}(i_p) = \frac{1}{\langle i_p\rangle}\, e^{-i_p/\langle i_p\rangle}$$

Приближение неистощимой накачки

В приближении неистощимой накачки: $\mathcal{E}_p = \text{const}$

Площадь стоксова импульса: $$\mathcal{A}_s(Z) = \int_{-\infty}^{\infty} dT\, \mathcal{E}_s(T, Z)$$

Аналитическое решение для площади стоксова импульса в приближении неистощимой накачки:

$$\mathcal{A}_s(Z) = \mathcal{A}_{s0} \exp\left(\frac{|\mathcal{E}_p|^2 Z}{\kappa \Gamma}\right)$$

$$|\mathcal{E}_p|^2 \simeq 1 + i_p, \qquad \langle i_p \rangle \ll 1$$

Функция распределения флуктуаций интенсивности: $$\mathcal{P}(i_p) = \frac{1}{\langle i_p \rangle} e^{-i_p/\langle i_p \rangle}$$

Приближение неистощимой накачки

Функция распределения для площади стоксова импульса:

$$\mathcal{P}(|\mathcal{A}_s|, Z) = \langle \delta[|\mathcal{A}_s| - |\mathcal{A}_s(Z)|] \rangle$$

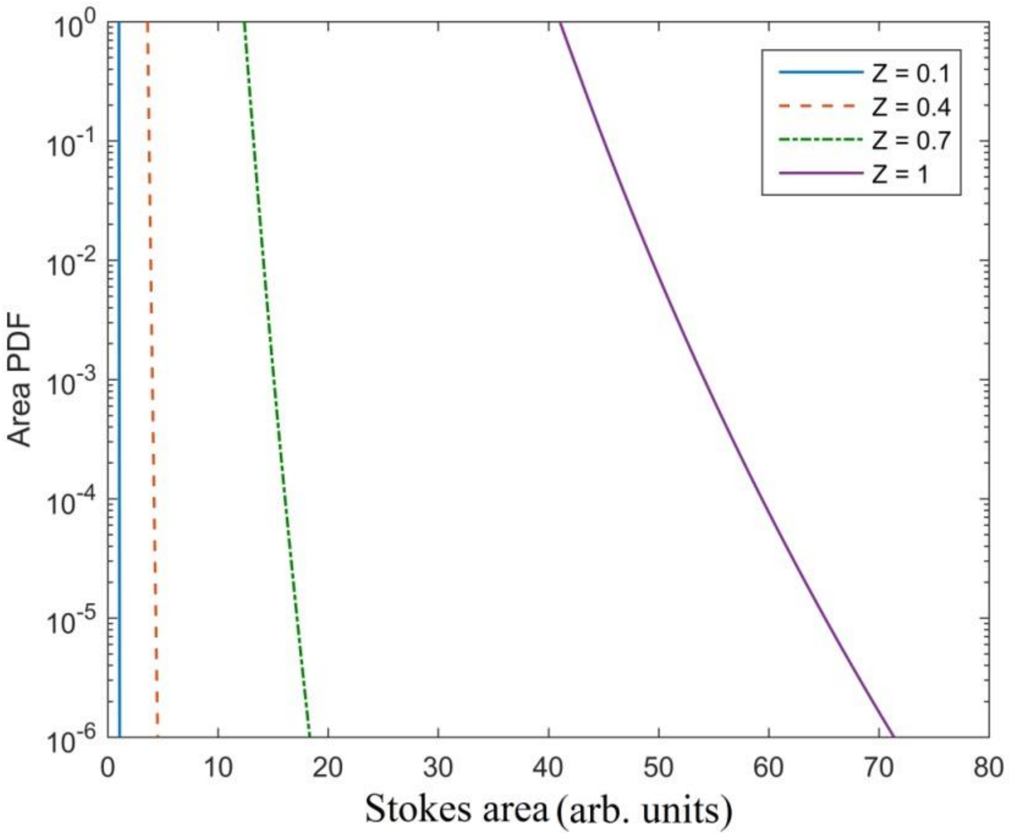
Для дельта функции верно, что

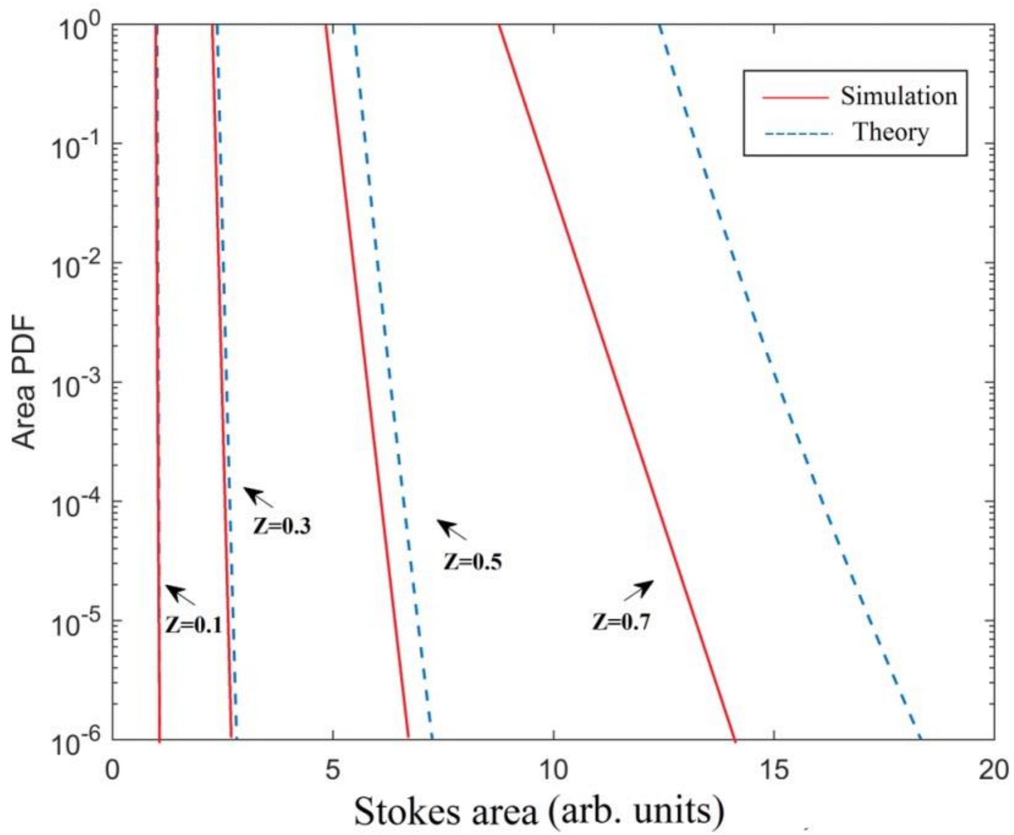
$$\delta(f(x)) = \sum_n \frac{1}{|f'(x_n)|} \delta(x - x_n)$$

Где x_n – корни функции *f(x)*.

$$\mathcal{P}(|\mathcal{A}_s|, Z) = \frac{\kappa \Gamma\, e^{1/\langle i_p \rangle}}{\langle i_p \rangle Z |\mathcal{A}_{s0}|} \left| \frac{\mathcal{A}_s}{\mathcal{A}_{s0}} \right|^{-1-\kappa\Gamma/\langle i_p \rangle Z} \theta(|\mathcal{A}_s| - |\mathcal{A}_{s0}| e^{Z/\kappa\Gamma}).$$

Приближение неистощимой накачки

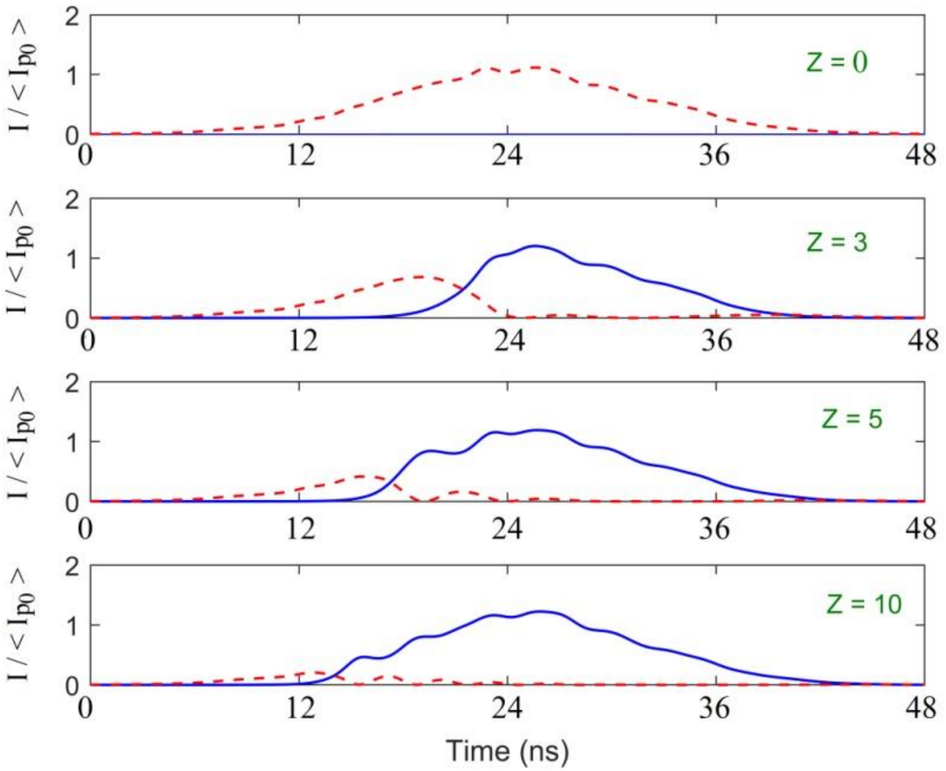




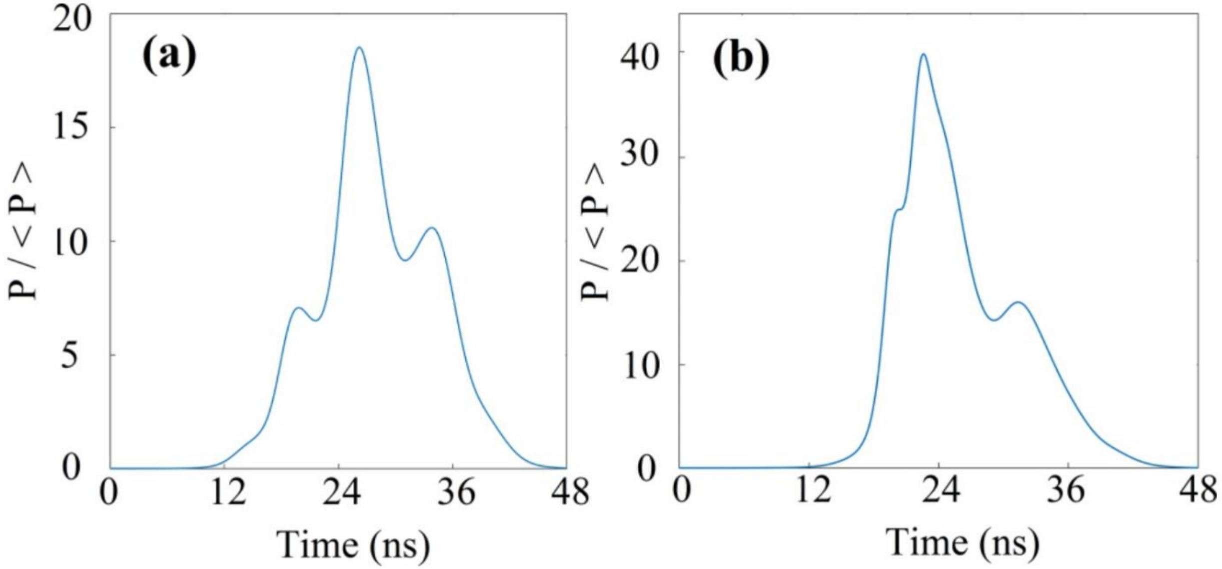
Функция распределения площади стоксова импульса в логарифмической шкале для разных расстояний распространения Z.

Численные значения параметров: $T_p = 10^2 T_s$, $P_s = 10^{-3} P_p$, $\Gamma = 0{,}24$.

Негауссова статистика вне приближения неистощимой накачки

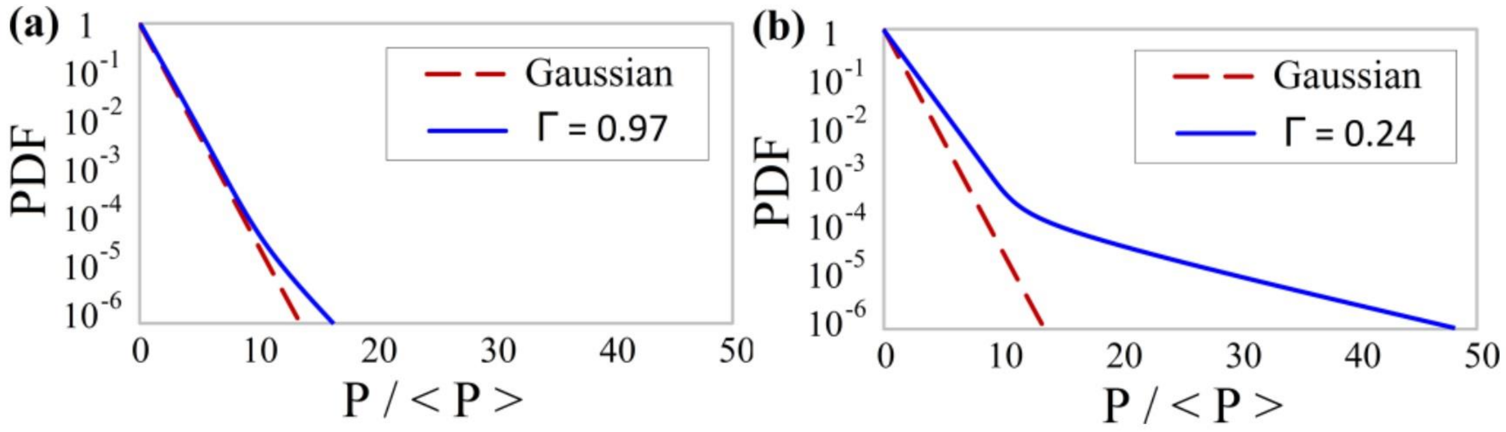


Профили средней интенсивности накачки (штриховая линия) и стоксова импульса (сплошная линия) для разных расстояний распространения.



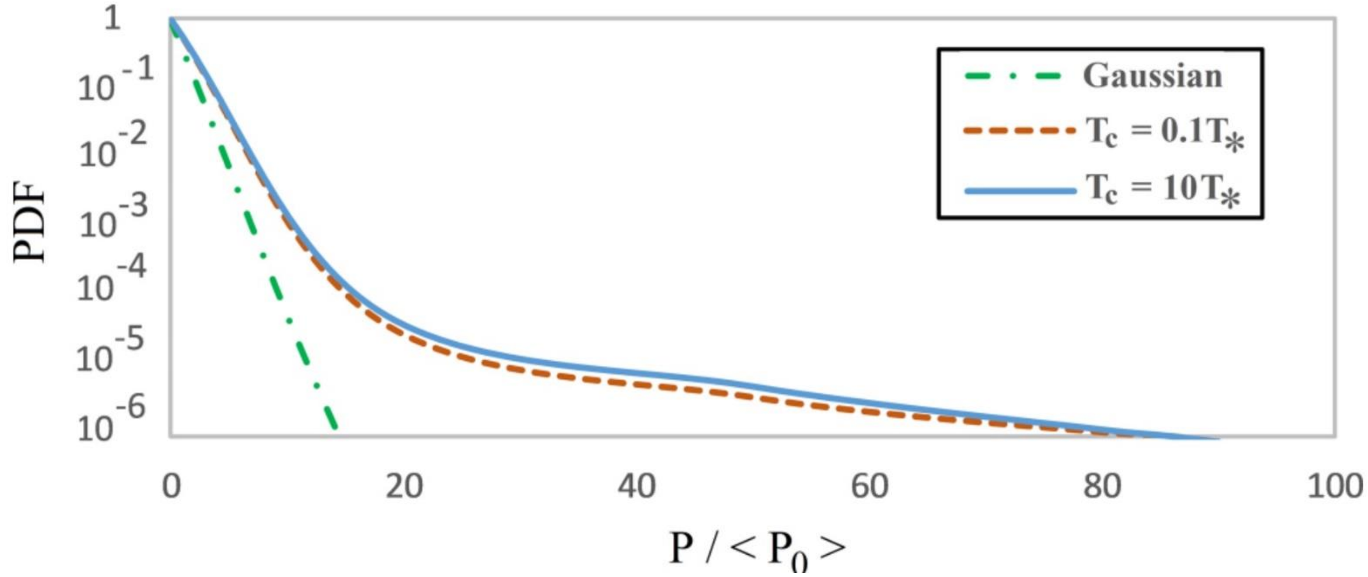
Стоксовы импульсы на выходе из волокна при a) $\Delta P_p / P_p = 0.3$, b) $\Delta P_p / P_p = 0.5$.

Негауссова статистика вне приближения неистощимой накачки



Функция распределения пиковой мощности стоксова импульса на выходе из волокна для a) относительно короткого и b) длительного времени памяти.

Функция распределения пиковой мощности стоксовых импульсов на выходе из волокна для относительно когерентного (сплошная) и почти некогерентного (пунктирная) источника.



Результаты

- За счет шумов накачки при вынужденном комбинационном рассеянии возможно образование стоксовых импульсов, функции распределения пиковой мощности которых обладают негауссовой статистикой (функция распределения с тяжелыми хвостами).

- Эффект памяти в такой системе играет решающую роль в возникновении негауссовой статистики.

- Структура функции распределения пиковой мощности стоксовых импульсов зависит от “количества” шума накачки, но не от его структуры.

Спасибо за внимание!