

А.Н. Глушков, Л.В. Стрельцова

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЛУКТУАЦИЙ ПАРАМЕТРА ШТРЕЛЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОРОГОВОГО УРОВНЯ**

Излагаются результаты исследований числовых характеристик частоты пересечений параметром Штреля порогового значения. Исследования выполнены с использованием адаптивной оптической системы первого порядка. Экспериментально выявлены основные закономерности в поведении средней частоты пересечений параметром Штреля порогового значения, а также её дисперсии в зависимости от величины порога и положения точки наблюдения относительно центра пятна излучения.

Качество работы адаптивных оптических систем (АОС) удобно характеризовать параметром Штреля  $K_{Ш}$ . При его исследовании обычно ограничиваются нахождением первого момента [1], в то время как для оптимизации АОС дополнительно необходимы сведения о поведении величины  $K_{Ш}$  во времени. В настоящей статье приводятся результаты исследований статистических характеристик пересечений параметром Штреля порогового уровня  $r_n$ , а также законов распределения интервалов между ними. Эти исследования выполнены экспериментально, с использованием АОС первого порядка [2]. Эксперименты проводились следующим образом. Излучение основной моды импульсно-периодического  $CO_2$ -лазера через проходной измеритель мощности наводилось на мишень, где были установлены регистраторы оптического излучения (РОИ), подключенные к ЭВМ (см. рис. 1). В последней осуществлялось документирование и обработка реализаций флуктуаций интенсивности оптического сигнала, зарегистрированного в фиксированных точках. Источниками этих флуктуаций являлись: турбулентность атмосферы, ошибки наведения излучения, а также флуктуационные эффекты, происходящие при его генерации. Параметры излучения

$$\rho_k/a \approx 0,1; \quad \Omega = \kappa a^2/L = 25; \quad \kappa = 2\pi/\lambda; \quad \lambda = 10,6 \text{ мкм}; \quad L = 10^4 \text{ м}; \quad L/F = 10; \quad a_p/a_n \leq 10^{-2},$$

где  $a$ ,  $\rho_k$ ,  $F$  — радиусы пространственной когерентности, излучающей апертуры и кривизны волнового фронта пучка;  $\lambda$  — длина волны;  $L$  — длина трассы;  $a_n$ ,  $a_p$  — радиусы пятна подсвета мишени и светочувствительного слоя РОИ соответственно; частота повторения импульсов 10 Гц, их длительность и длительность зарегистрированных реализаций соответственно 30 мкс и 60 с. Эксперименты проводились на приземной трассе в октябре месяце, ночью, при ясной погоде. Метеорологическая дальность видимости была не менее 60 км, а структурная характеристика флуктуаций диэлектрической проницаемости воздуха не превышала  $10^{-16} \text{ м}^{-2/3}$ .

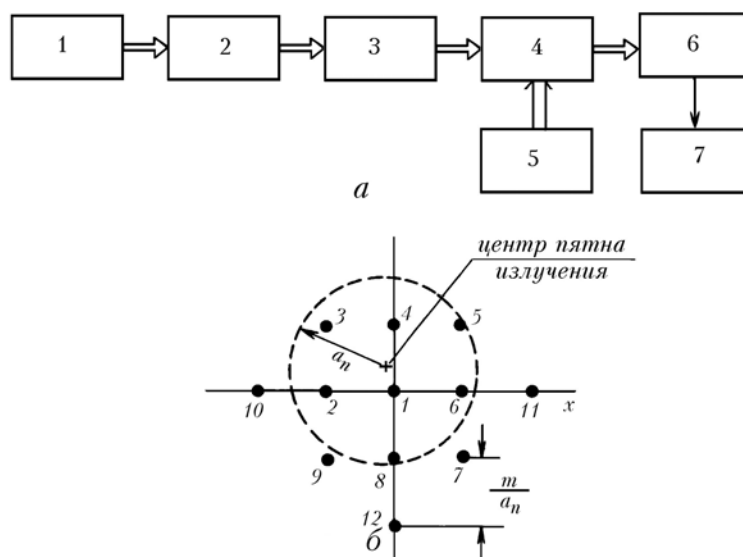


Рис. 1. Схема проведения эксперимента (а): 1 — лазер; 2 — диафрагма; 3 — проходной измеритель мощности; 4 — зеркало наведения; 5 — блок управления зеркалом 4; 6 — мишень; 7 — ЭВМ; схема расположения РОИ (б): 1÷12 — фиксированные точки регистрации оптического сигнала

С целью получения статистических характеристик пересечений параметром Штреля  $K_{III}$  порогового уровня зарегистрированные сигналы обрабатывались следующим образом. По данным проходного измерителя мощности рассчитывалось максимальное вакуумное значение интенсивности сигнала в плоскости мишени  $I_{\max} = \frac{P_{II}}{\pi a_{II}^2}$ ,

$$a_{II}^2 = a^2 \left[ \left( 1 - \frac{L}{F} \right)^2 + \Omega^{-2} \left( 1 + \frac{a^2}{\rho_K^2} \right) \right],$$

где  $P_{II}$  — излучаемая мощность. Затем на величину  $I_{\max}$  нормировалась каждая зарегистрированная реализация. В  $n$  одинаковых по длительности участках каждой реализации подсчитывалось количество превышений параметром  $K_{III}$  заданного уровня  $r_{II}$ . По ним определялись средняя частота пересечений  $\bar{N}_j$ , а также ее дисперсия  $\sigma$

$$\bar{N}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{ij}; \quad \sigma_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (f_{ij} - \bar{N}_j)^2; \quad f_{ij} = M_{ij}/t;$$

$M_{ij}$  — количество превышений параметром  $K_{III}$  уровня  $r_{II}$  на  $i$ -м участке  $j$ -й реализации сигнала;  $t$  — длительность участка.

На рис. 2 приведены результаты исследований средней частоты пересечений параметром Штреля порогового уровня с положительным наклоном  $\bar{N}_{+j}$ , а также ее относительной дисперсии  $\sigma_{+j}^2 / \bar{N}_{+j}$  в зависимости от величины порога и смещения РОИ от центра пятна излучения к краю  $m/a_{II}$ .

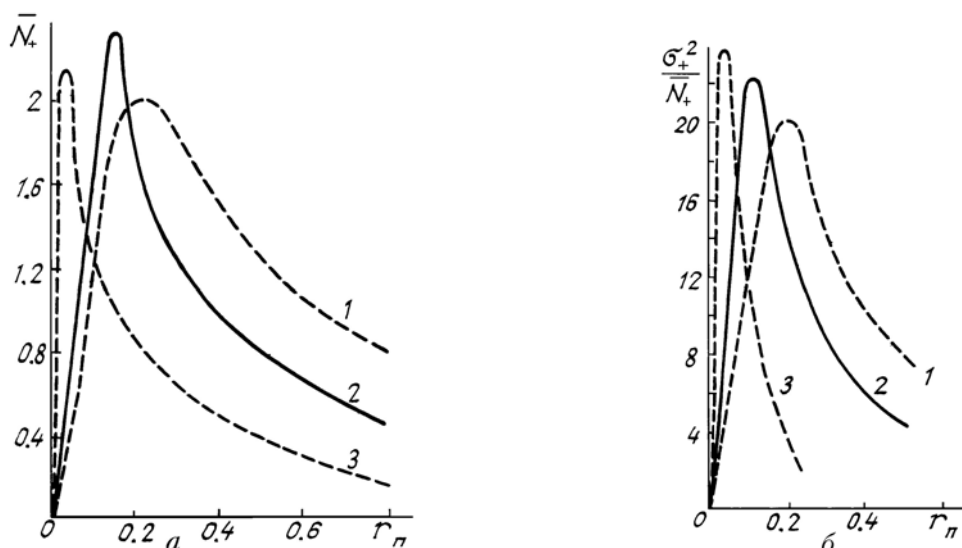


Рис. 2. Статистические характеристики частоты пересечений параметром Штреля порогового уровня. Кривая 1 — для РОИ № 1, 2 — для РОИ № 2, 3 — для РОИ № 10

Характеристики пересечений параметром  $K_{III}$  уровня  $r_{II}$  с отрицательным наклоном аналогичны приведенным. Экстремальный характер приведенных зависимостей объясняется следующим. При  $r_{II} = 0$  реализация  $K_{III}$  находится над порогом и пересечения между ними отсутствуют. С ростом  $r_{II}$  пересечения начинают появляться. При  $r_{II} \ll 1$  они редки, моменты их появления независимы и при  $\sigma_{+j}^2 / \bar{N}_{+j} \ll 1$  данные пересечения можно рассматривать как стационарный ординарный поток событий без последствия. То же самое имеет место при  $r_{II} \rightarrow 1$ , когда реализация параметра  $K_{III}$  «уходит» под порог. А при значениях  $r_{II}$ , близких к  $\bar{K}_{III}$ , число пересечений максимально. Любопытным при этом является то, что при увеличении  $m/a_{II}$  вначале происходит увеличение  $\bar{N}_{+\max}$ , а затем уменьшение. Рост  $\bar{N}_{+\max}$  при увеличении  $m/a_{II}$  объясняется возрастанием флуктуаций интенсивности оптического сигнала при смещении точки наблюдения из центра пятна к его краю. При больших значениях  $m/a_{II}$  уменьшается вероятность попадания РОИ в пятно подсвета вследствие случайных блужданий последнего. Это приводит к уменьшению колебательности  $K_{III}$  относительно  $r_{II}$  и, как следствие, к уменьшению  $\bar{N}_{+\max}$ .

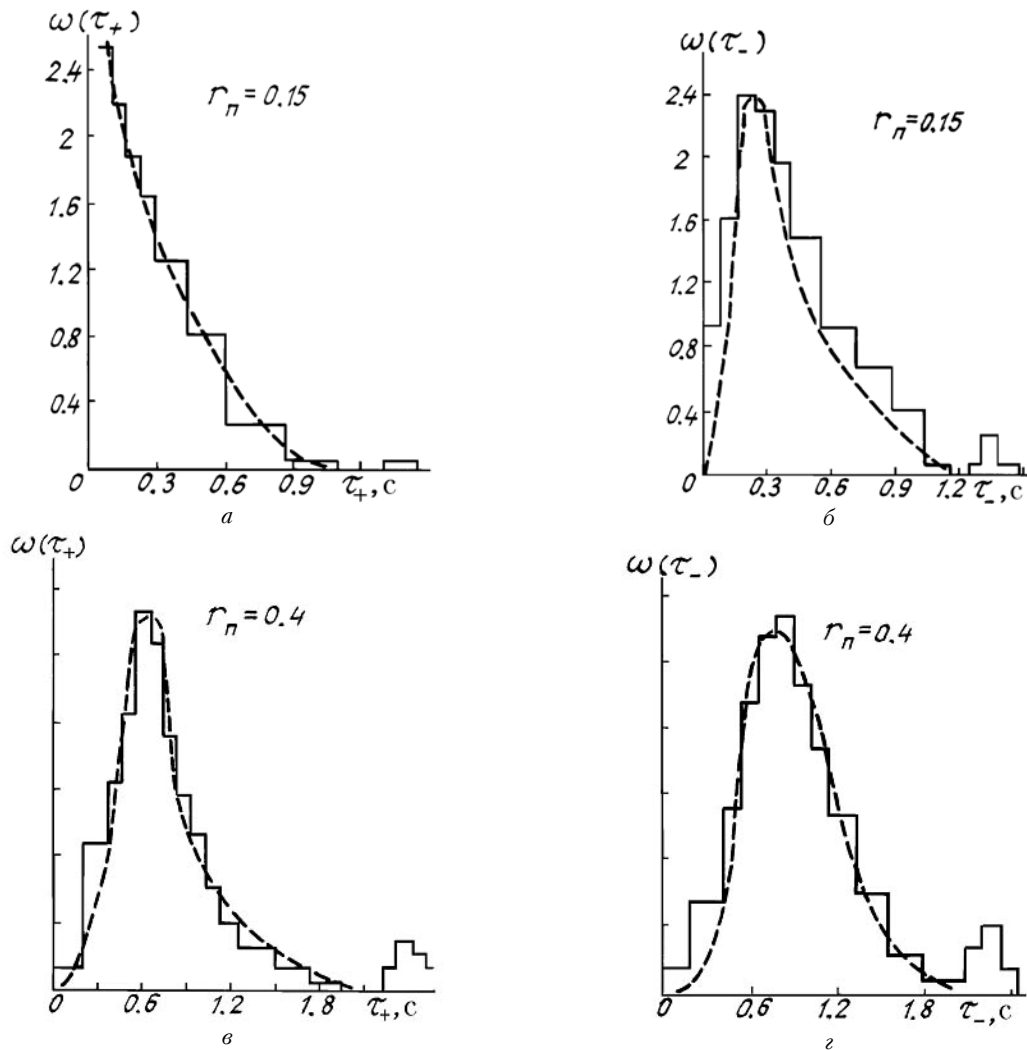


Рис. 3. Плотность вероятности интервалов пересечений параметром Штреля порогового значения: *а* – экспоненциальное распределение; *б* – рэлеевское распределение; *в, г* – логнормальное распределение

При нахождении законов распределения выбросов параметра Штреля относительно порогового уровня по длительности для каждого значения  $r_n$  строились группированные статистические ряды значений  $\tau_+$  и  $\tau_-$ , из которых затем получали гистограммы;  $\tau_+$ ,  $\tau_-$  – временные интервалы, в течение которых параметр  $K_{III}$  был выше порога и ниже его соответственно. Затем гистограммы выравнивались типовыми законами распределения, после чего осуществлялась проверка правдоподобия принятых гипотез с помощью критерия согласия  $\chi^2$ . В результате проведенных исследований выявлены следующие закономерности в поведении законов распределения значений  $\tau_+$  и  $\tau_-$  в зависимости от величины  $r_n$ . (Результаты приводятся для РОИ № 1, поскольку в других РОИ выявленные закономерности носят аналогичный характер). При малых значениях  $r_n$  ( $r_n \ll 1$ ), когда выбросы  $K_{III}$  редки и моменты их появления независимы, плотность вероятности интервалов ( $\tau_+$ ) хорошо аппроксимируется экспоненциальным распределением (рис. 3, *а*). Это совпадает с известным результатом о том, что плотность вероятностей выбросов стационарного случайного процесса экспоненциально спадает с увеличением  $r_n$  [3]. В то же время при  $r_n \ll 1$  и области малых  $\tau$  временные интервалы  $\tau_-$  подчиняются распределению Рэля (рис. 3, *б*). В области больших  $\tau$  оно дает заниженные результаты. С увеличением  $r_n$  происходит увеличение частоты пересечений параметром  $K_{III}$  порогового уровня и при  $\bar{N} \gg 1$  плотности вероятности упомянутых временных интервалов  $\tau_+$  и  $\tau_-$  аппроксимируются логнормальными распределениями (рис. 3, *в, г*). Причем при  $P(K_{III} \geq r_n) = P(K_{III} \leq r_n)$  эти распределения имеют одинаковые параметры. Здесь  $P(\cdot)$  – вероятность выполнения условия  $K_{III} \geq r_n$  или  $K_{III} \leq r_n$ . При дальнейшем увеличении  $r_n$  число выбросов  $K_{III}$  относительно порогового уровня уменьшается и плотность вероятности интервалов  $\tau_-$  переходит из экспоненциального распределения, а интервалы  $\tau_+$  в области малых значений  $\tau$  аппроксимируются распределением Рэля. Отсутствие унимодальности в приведенных распределениях может быть объяснено наличием в спектре реализаций  $K_{III}$  ярко выраженных низкочастотных и высокочастотных составляющих флуктуаций. Случайная амплитуда заре-

гистрированного оптического сигнала характеризуется четырьмя временными масштабами. Первый из них связан с временем когерентности лазерного источника  $10^{-3} \div 10^{-12}$  с, второй характеризуется временем изменения состояния атмосферы  $10^{-1} \div 10^{-3}$  с [4], а третий и четвертый соответственно определяются временем корреляции ошибки наведения  $\sim 0,35$  с и постоянной времени РОИ  $\sim 10^{-5}$  с. Исходя из этих масштабов, можно утверждать, что поскольку глобальные максимумы в приведенных распределениях плотности вероятности находятся в области малых  $\tau$ , то основную колебательность  $K_{III}$  относительно  $r_n$  определяют высокочастотные составляющие спектра, характеризующие турбулентностью атмосферы и когерентными свойствами лазерного источника.

Имеющаяся в распоряжении авторов аппаратура, к сожалению, не позволила оценить, в какой степени эти результаты определяются турбулентностью атмосферы, а в какой флуктуационными эффектами, сопровождающими генерацию излучения в лазере.

1. Бакут П.А., Киракосянц В.Е., Логинов В.А. //Изв. вузов. Физика. 1985. № 11. С. 64.
2. Сигналы и помехи в лазерной локации/В.М. Орлов, И.В. Самохвалов, Г.М. Креков и др. /Под ред. В.Е. Зуева. М.: Радио и связь, 1985, 264 с.
3. Тихонов В.И. Выбросы случайных процессов. М.: Наука, 1970. 392 с.
4. Орлов В.М., Самохвалов И.В., Матвиенко Г.Г. и др. Элементы теории светорассеяния и оптическая локация. Новосибирск: Наука, 1982. 225 с.

Поступила в редакцию  
26 июня 1991 г.

**A.N. Glushkov, L.V. Streltsova. Statistical Characteristics of the Strehl Parameter Fluctuations near Its Threshold Value.**

This paper presents some results of the experimental study of statistical characteristics of the events when the Strehl parameter crosses the threshold level. Some basic regularities in the behaviour of these characteristics depending on the threshold value as well as on the position of an observation point on the laser beam cross-section are revealed and explained. The obtained results could be useful for specialists in adaptive systems technology.