

УДК 551.593.629.198.3; 551.593.52

ОСОБЕННОСТИ ВЕРОЯТНОСТНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С ИЗМЕРЕНИЯМИ СПЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМЕ ЗЕМЛЯ–АТМОСФЕРА С ПОМОЩЬЮ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

© 2004 г. А. В. Иванов, канд. физ.-мат. наук; А. А. Каменев, канд. техн. наук;
В. Д. Стариченкова, канд. техн. наук

ВНЦ "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", Санкт-Петербург

Рассмотрены особенности одномерных распределений вероятностей для случайных величин в виде количества испускаемых квантов оптического излучения от двух различных типов объектов в системе Земля–атмосфера (звезды и дневного диска Земли), регистрируемых с помощью оптико-электронной аппаратуры.

Коды OCIS: 010.1300, 260.7190, 300.0300.

Поступила в редакцию 05.04.2004.

Введение

В статье рассмотрены принципиальные отличительные особенности одномерных распределений вероятностей случайных величин, связанных с измерениями спектроэнергетических характеристик оптического излучения от различных типов фоновых и целевых объектов (излучателей) в системе Земля–атмосфера. При этом под действительной непосредственно измеряемой дискретной случайной величиной с одномерным распределением вероятностей вдоль одной числовой оси понималось конечное целое число элементарных событий, т. е. случайное (достаточно большое) число N сосчитанных кратковременных электронных импульсов на выходе фотоприемного устройства (ФПУ) измерительной оптико-электронной аппаратуры (ОЭА), регистрируемых в разрешаемом интервале спектра для длины волны λ со случайной скоростью счета импульсов n (средней за выбранный интервал времени t накопления считываемого заряда на выходе ФПУ). Соответствующее этому (с учетом квантового выхода ФПУ) случайное число сосчитанных квантов оптического монохроматического излучения физически может быть обусловлено либо дробовым эффектом в случае наблюдения естественного или искусственного калибровочного излучателя, т. е. однородного по пространству и стабильного во времени протяженного (или точечного) близкого к идеальному источника излучения (при случайном числе импульсов N^*), либо случайными про-

странственными и временными вариациями спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) в случае наблюдения естественного или искусственного исследуемого объекта, т. е. неоднородного по пространству и нестабильного во времени протяженного реального источника излучения (при случайном числе импульсов). Если число сосчитанных импульсов достаточно велико и эти импульсы следуют друг за другом в разрешаемом интервале спектра за время накопления достаточно часто, то в соответствии с теорией [1] случайный процесс, описываемый дискретными случайными величинами, может быть достаточно хорошо аппроксимирован путем описания его соответствующими условно непрерывными случайными величинами.

Представляют интерес некоторые экспериментальные результаты, полученные в работах [2, 3] с помощью космической измерительной ОЭА как для близкого к идеальному (звезда), так и для реального (дневной диск Земли) источников излучения, характеризующихся различными законами вероятностных распределений непосредственно измеряемых в виде числа квантов излучения одномерных случайных величин, отличными от нормального (гауссова) закона распределения. Проведенный нами анализ этих результатов позволяет сделать вывод о том, что в первом случае (при измерении облученности от звезды) описывающий дробовой эффект экспериментальный пуассоновский закон распределения одних дискретных случайных величин N^* может быть достаточно хорошо аппроксимирован нормальным

законом распределения соответствующих условно непрерывных случайных величин N^* [1] (полагая, что дисперсия случайной величины применительно к закону Пуассона равна математическому ожиданию этой величины [1]), а во втором случае (при измерении яркости диска Земли) экспериментальный закон распределения других дискретных случайных величин N может быть достаточно хорошо аппроксимирован логарифмически нормальным законом распределения соответствующих условно непрерывных случайных величин N (частный случай распределения Кэптейна [1]).

Анализ экспериментальных работ (в том числе [2–4] для УФ и ИК диапазонов спектра) показывает, что действительно в большинстве практически важных случаев именно логарифмически нормальное одномерное вероятностное распределение можно считать достаточно хорошим приближением для распределения СПЭЯ реальных источников излучения в виде протяженных природных образований любого типа. Практика подтвердила, что чем более однородный по пространству участок смешанного природного фона (ландшафта) удастся выделить в мгновенном угловом поле зрения отдельного фоточувствительного элемента ФПУ, тем лучше распределение случайных величин СПЭЯ аппроксимируется логарифмически нормальным законом [4]. В то же время для неоднородных или быстро сменяющих друг друга в мгновенном угловом поле зрения различных однородных ландшафтов, а также при пространственном сканировании по диску Земли [3, 4] суммарные плотности распределения вероятности получения тех или иных значений случайных величин СПЭЯ могут быть и многомодальными. В таких случаях закон вероятностного распределения случайных величин СПЭЯ каждого из типов ландшафтов остается везде логарифмически нормальным, но суммарная плотность распределения СПЭЯ может быть представлена в виде суперпозиции нескольких логарифмически нормальных распределений, которые соответствуют [3, 4] центрам распределения СПЭЯ различных типов объектов, одновременно или попеременно попадающих в мгновенное угловое поле зрения, и вероятностям, с которыми эти типы объектов могут наблюдаться в процессе измерений.

В [4] было отмечено, что только точное знание законов вероятностного распределения для оптического излучения каждого из типов исследуемых объектов позволяет правильно проводить первичную статистическую обработку получаемых для каждого конкретного типа излучателя экспериментальных результатов, правильно оценивать с помощью гауссова интеграла вероятностей (т. е. с помощью одного из статистических критериев, разработанного для нормального вероятностного распределения непре-

рывных случайных величин) достоверность (характеризуемую доверительной вероятностью [5]) полученных с помощью ОЭА условно непрерывных (т. е. измеренных с достаточно большой частотой дискретных) случайных значений величин и правильно рассчитывать ожидаемые при последующих натурных измерениях вероятности появления тех или иных уровней (граничных значений интервалов изменения) интенсивности излучения исследуемых объектов.

Цель данной статьи состоит в уточнении методики применения существующих вероятностных критериев оценки доверительной вероятности [5] в доверительном интервале изменения значений одномерных случайных величин, получаемых при натурных измерениях с помощью ОЭА оптического излучения различных типов объектов. При выборе порогового уровня отношения полезного сигнала к уровню помех должны учитываться различные законы вероятностного распределения измеряемых одномерных случайных величин, обусловленные физической природой оптического излучения от источников различных типов.

Результаты экспериментов по регистрации оптического излучения от различных типов излучателей в системе Земля–атмосфера

В качестве иллюстрации рассмотрим работу [2], в которой приведены экспериментальные данные для одного из спектральных измерительных каналов БС2 бортового УФ спектрометра “Бриз” при регистрации с помощью ФЭУ-142 спектров излучения от двух типов излучателей: излучения звезды Алкайд (созвездие Большой Медведицы), использовавшейся в качестве калибровочного источника излучения непосредственно в процессе космического полета орбитального комплекса “Мир”, и излучения дневного диска Земли, представлявшего собой реальный источник излучения (в данном частном случае – только верхних слоев безоблачной атмосферы).

Для данного типа ФЭУ число электронных импульсов от внутриприборных помех (независимо от длины волны) было равно нулю.

Таким образом, в работе [2] были получены два варианта синтезированных по 100 спектрам значений непосредственно регистрируемых аппаратурой спектральных скоростей счета импульсов для двух различных типов излучателей:

иллюстрирующая характер нормального вероятностного распределения условно непрерывных случайных спектральных величин $N^*(\lambda)$ спектральная скорость счета $n^*(\lambda) = N^*(\lambda)/t$, полученная на одной из ступеней усиления при интервале времени счета $t = 0,32$ с и сопоставлявшаяся затем с известными из

справочного атласа данными о спектральной плотности облученности от звезды с целью определения спектральной энергетической чувствительности прибора;

иллюстрирующая характер логарифмически нормального вероятностного распределения условно непрерывных случайных спектральных величин $N(\lambda)$ спектральная скорость счета $n(\lambda) = N(\lambda)/t$, полученная при интервале времени счета $t = 0,008$ с и сопоставлявшаяся затем с известными по результатам калибровки данными о спектральной энергетической чувствительности прибора с целью определения СПЭЯ дневного диска Земли.

На рис. 1 и 2 представлены более детально обработанные нами экспериментальные данные [2].

На рис. 1 кривой 1 показаны средние арифметические значения $\bar{N}^*(\lambda)$, а кривыми 2 и 3 – верхняя и нижняя условные границы, соответствующие двойному среднему квадратичному отклонению (СКО) $\pm 2\sigma^*$, в пределах которых лежат 95,45% всех непосредственно зарегистрированных спектральных значений условно непрерывных случайных величин $N^*(\lambda)$ с пуассоновским вероятностным распределением, аппроксимированным нормальным вероятностным распределением.

На рис. 2 кривой 1 показаны средние арифметические значения натуральных логарифмов $\ln N(\lambda)$, а кривыми 2 и 3 – верхняя и нижняя условные границы, соответствующие двойному логарифмическому СКО $\pm 2\sigma_{\ln}$, в пределах которых лежат 95,45% всех логарифмов $\ln N(\lambda)$ непосредственно зарегистри-

рованных спектральных значений условно непрерывных случайных величин $N(\lambda)$ с логарифмически нормальным вероятностным распределением. Кривая 4 – аппроксимационная кривая, ранее использовавшаяся в [2].

Анализ первой части работы [2] (рис. 1) показывает, что значения обычного СКО σ^* (и доверительная вероятность измерений) не зависят от физической природы данного типа излучателя, но зависят от абсолютного уровня интенсивности излучения того или иного конкретного калибровочного источника, используемого для прибора “Бриз” (лабораторная водородно-дейтериевая газоразрядная лампа ВМФ, встроенный в прибор радиолюминесцентный источник (РЛИ) или выбранная звезда), а также зависят от изменений этого уровня с длиной волны излучения. Дисперсия случайной величины в этом случае применительно к закону Пуассона всегда равна математическому ожиданию [1]. В работе [2] этот вопрос не рассматривался.

В настоящей работе показано, что для ФЭУ канала БС2 от РЛИ имеем $\bar{N}^*(\lambda) = 381$; $\sigma^* = 19,5$ (при $t = 0,055$ с), а от звезды $\bar{N}^*(\lambda) = 20-81$; $\sigma^* = 4,5-9$ (при $t = 0,32$ с).

Анализ второй части работы [2] (рис. 2) показывает, что значения логарифмического СКО $\sigma_{\ln}$ (и доверительная вероятность измерений) зависят от физической природы данного типа излучателя, но не зависят от абсолютного уровня интенсивности излучения того или иного конкретного реального источника, а

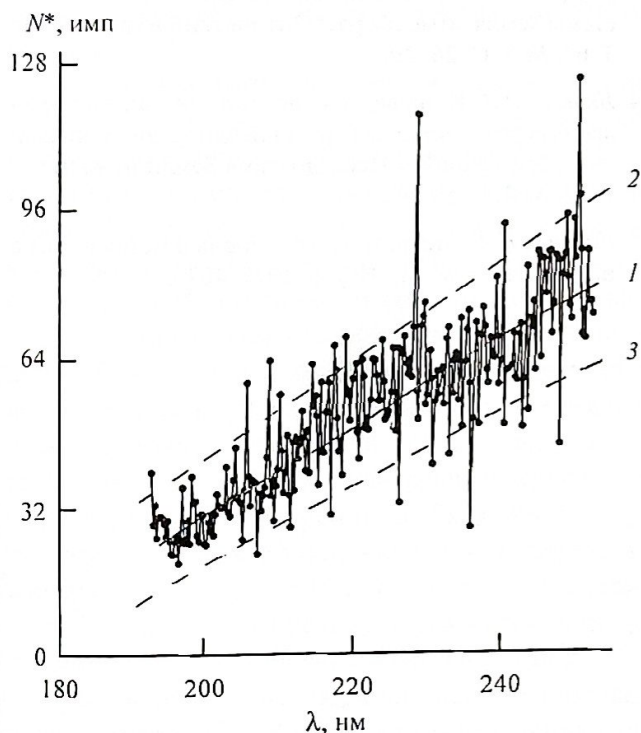


Рис. 1. Случайные значения числа импульсов $N^*(\lambda)$, сосчитанные за время $t = 0,32$ с в канале БС2 прибора “Бриз” для звезды Алкайд (пояснения в тексте).

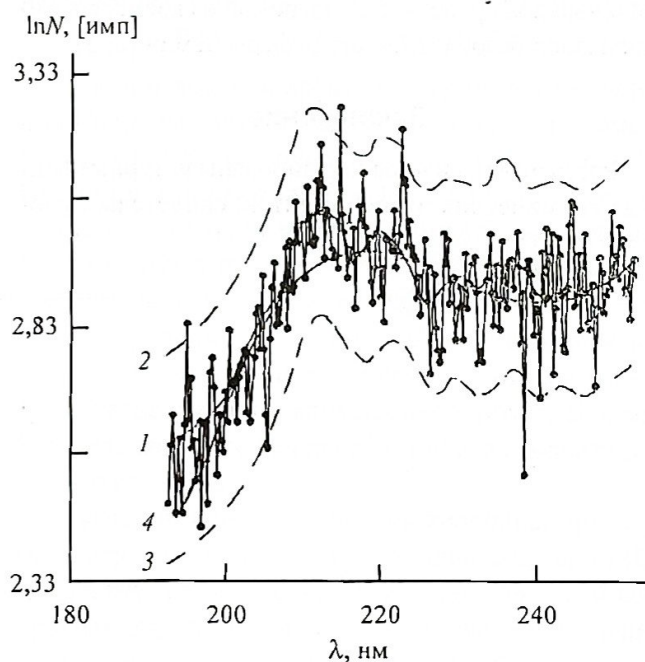


Рис. 2. Случайные значения логарифма числа импульсов $\ln N(\lambda)$, сосчитанные за время $t = 0,008$ с в канале БС2 прибора “Бриз” для дневного диска Земли (пояснения в тексте).

также не зависят от изменений этого уровня с длиной волны излучения. Значение σ_{in} составляет примерно 0,104 (для подстилающей поверхности при безоблачной атмосфере). Дисперсия случайной величины в этом случае не зависит от величины математического ожидания. Это соответствует экспериментальным данным [3] для бортового УФ спектрометра "БУФС" (ИСЗ "Метеор-3") при регистрации с помощью ФЭУ-142 излучения от реальных излучателей в виде ряда природных образований системы Земля-атмосфера (подстилающая поверхность при безоблачной атмосфере, более яркие низкие водяные облака и еще более яркие высокие ледяные облака, где величина σ_{in} составляла 0,099, и совсем мало яркая безоблачная атмосфера над подстилающей поверхностью, где величина σ_{in} составляла 0,297).

Как следует из рис. 2, использование в [2] аппроксимирующей кривой 4, соответствующей синтезированному по 100 спектрам усреднению на основе среднеквадратичного приближения для каждого разрешаемого интервала длин волн непосредственно измеряемых значений скорости счета импульсов, привело к некоторому отлнчию (в пределах 20%) ее спектрального хода от ожидаемого по физическому смыслу спектрального хода аппроксимирующей кривой 1, соответствующей усреднению для каждого разрешаемого интервала длин волн вычисляемых значений натуральных логарифмов случайного числа сосчитанных импульсов и значений СКО этих логарифмов. Вместе с тем, обе использовавшиеся аппроксимации достаточно достоверно для ряда практических задач воспроизводят качественный спектральный ход яркости, наблюдаемой из космоса в УФ диапазоне безоблачной атмосферы Земли [2, 3].

Заключение

Рассмотрены и проанализированы натурные данные космических экспериментов, свидетельствующие

о существенных различиях в законах (либо нормальный, либо логарифмически нормальный) вероятностного распределения измеряемых с помощью ОЭА условно непрерывных одномерных случайных величин в виде числа электронных импульсов, обусловленных потоком излучения от исследуемых объектов различных типов в системе Земля-атмосфера – звезды и дневного диска Земли (соответственно либо не обладающих, либо обладающих пространственными и временными неоднородностями излучения).

Авторы приносят глубокую благодарность А.И. Ефремову за предоставление экспериментальных результатов, полученных с помощью бортового УФ спектрометра "Бриз", а также А.А. Яковлеву и В.А. Романову за полезные обсуждения материалов данной статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1977. С. 539–606.
2. Ефремов А.И., Каменев А.А., Романов В.А., Савченко С.А., Серова С.И., Стариченкова В.Д. Измерение фонового излучения дневного диска Земли в УФ диапазоне бортовым спектрометром "Бриз" // Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 5. С. 23–25.
3. Барышева В.И., Иванов А.В., Каменев А.А., Стариченкова В.Д. Пространственно-временные вариации ультрафиолетового восходящего излучения фонов системы Земля-атмосфера // Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 3. С. 26–29.
4. Яковлев А.А. К проверке гипотез о законах распределения вероятностей для яркостей однородных природных образований // Исследования Земли из космоса. 1982. № 4. С. 59–65.
5. Браунли К.А. Статистическая теория и методология в науке и технике. М.: Наука, 1977. 407 с.