

УДК 621.384

ЕСТЕСТВЕННЫЕ ФОНОВЫЕ ПОМЕХИ В ОКНАХ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ

(Обзор)

В. А. Фираго, Б. Ю. Ханох, В. В. Долинин

СОДЕРЖАНИЕ

1. Природа флуктуаций мощности оптического излучения естественных фонов
2. Описание и представление основных характеристик оптического излучения фонов
3. Модели пространственных флуктуаций яркости естественных фонов
4. Статистические характеристики естественных фоновых помех

Оптическое излучение естественных фонов — важный источник информации о физических процессах, протекающих в атмосфере, океане, водоемах, на поверхности суши и т. д. Однако для оптико-электронных систем (ОЭС), регистрирующих слабые источники оптического излучения на неоднородном фоне, оно является помехой. Пространственные и временные флуктуации фонового излучения оказывают большое влияние на качество работы ОЭС. Для повышения эффективности действия ОЭС применяют различные способы пространственной и электронной фильтрации [1–9]. Проектирование оптимальных фильтров, оценка помехозащищенности и точности работы этих систем невозможны без знания основных свойств и статистических характеристик флуктуаций фонового излучения [5–13]. Однако до сих пор в научно-технической литературе имеются лишь некоторые неполные характеристики и различные гипотетические модели фоновых помех, эффективность использования которых, а порой и применимость для практических целей остаются дискуссионными [3–23]. Это обстоятельство вызывает у некоторых авторов [24] вообще неверие в возможность расчета характеристик обнаружения ОЭС по известным статистическим характеристикам фонов. Вся эта информация о фонах в основном содержится в разрозненных публикациях, поэтому целью данного обзора является обобщение имеющихся в литературе сведений о фоновых помехах, анализ проблем описания, моделирования и определения их основных статистических характеристик.

1. ПРИРОДА ФЛУКТУАЦИЙ МОЩНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ ФОНОВ

Естественные фоны многообразны: небосвод, ландшафты, города, поселки, озера, моря и т. п. При регистрации с Земли оптического излучения объектов, расположенных выше горизонта, фоном является небо. Оно образуется земной атмосферой, включая туман, пыль, облака, осадки, и объектами вне атмосферы — Луна, планеты, звезды, Солнце и т. д. Оптическое излучение дневного и ночного небосвода сильно различается.

Излучение дневного неба состоит из двух основных частей:

- 1) солнечного света, рассеянного молекулами воздуха, туманом, об-

лаками и другими частицами (аэрозолями) и преобладающего в видимой и ближней инфракрасной области спектра (до ~ 3 мкм); полосы поглощения водяного пара (H_2O), двуокиси углерода (C_2O) и других газовых составляющих атмосферы ослабляют часть рассеянного излучения, достигающего поверхности Земли; интенсивность рассеянного солнечного света уменьшается с высотой и в очень ясные дни;

2) собственного излучения атмосферы, преобладающего у поверхности Земли на длинах волн, больших ~ 4 мкм.

В излучении ночного неба рассеянное излучение Солнца практически отсутствует. Собственное излучение атмосферы существенно не изменяется. Измеримые интенсивности создаются излучением звезд в видимой, ближней инфракрасной области спектра и в более далеких участках спектра, преимущественно в окнах прозрачности атмосферы.

Очевидно, что флуктуации излучения небосвода обусловлены пространственной и временной неоднородностью атмосферы, а именно, наличием облачности, градиентов температуры, давления, турбулентных и иных воздушных потоков, флуктуаций плотности газовой среды и т. п.

При регистрации с Земли или с летательных аппаратов оптического излучения объектов, расположенных ниже горизонта, фоном являются ландшафты, города, озера, моря и т. п. Их оптическое излучение также состоит из отраженного и собственного излучения. Днем оптическое отраженное излучение фонов обусловлено главным образом прямым и рассеянным излучением Солнца и превышает собственное излучение при длинах волн, меньших ~ 3 мкм. Средние значения спектральных коэффициентов яркости и коэффициентов отражения некоторых земных покровов можно найти в [23, 25].

При длинах волн, больших ~ 4 мкм, относительные спектральные энергетические яркости излучения наземных фонов и абсолютно черного тела с такой же температурой достаточно хорошо совпадают. Это собственное излучение фона, как и отраженное, сильно поглощается атмосферой и только в окнах прозрачности оказывает мешающее действие на работу оптико-электронных систем.

Флуктуации инфракрасного излучения наземных фонов обусловлены временными и пространственными градиентами как собственного, так и отраженного оптического излучения, которые, в свою очередь, зависят от температуры, коэффициентов излучения и отражения, положения и структуры объектов, входящих в фоновое образование, условий наблюдения и т. п.

2. ОПИСАНИЕ И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ФОНОВ

Яркость естественных фонов зависит от большого числа переменных: координат излучающих точек (x, y, z — в декартовой системе координат или ρ, θ, φ — в сферической), времени наблюдения t , длины волны излучения λ , типа фона и условий наблюдения V_y . Поэтому рассчитывать ее пока не представляется возможным, основные данные получают из непосредственных измерений. Задачи, связанные с измерениями энергетической яркости фонов, касаются вопросов достижения достаточно высокого спектрального, пространственного и временного разрешения, а также решения проблемы выбора условий наблюдения. Если эти проблемы решены, то остается другой, не менее сложный вопрос — представление экспериментальных данных.

Обсуждается несколько нестатистических методов представления экспериментальных данных о пространственном распределении энергетической яркости фона [17, 18]: 1) инфракрасное изображение фона, 2) линия сканирования, 3) контурная карта или таблица, 4) изофоты.

С помощью этих методов можно выделить точки или области большой яркости, быстро оценить, с чем они связаны, их форму и размер. Инфракрасное изображение можно поместить в имитатор фонов и экспериментально оценить помехозащищенность ОЭС при воздействии того или иного фона. Основным недостатком нестатистических методов описания являются трудности представления очень большого числа разнообразных фоновых ситуаций, встречающихся на практике.

Эти трудности можно уменьшить, применяя статистические методы описания. Большинство фонов (небосвод, водные поверхности, лесной массив и т. д.) в первом приближении можно рассматривать как случайное яркостное поле, которое описывается статистическими методами. При статистическом описании конкретные реализации фона не представляют интереса, важно знать всевозможные распределения яркости фона и вероятности их появления. Большую группу фонов в прошлом и будущем называют фоновым ансамблем. Экспериментально можно исследовать небольшую группу фонов из ансамбля и, когда накопится достаточное количество данных, делать обобщения.

Случайное яркостное поле может быть полностью определено в вероятностном смысле с помощью многомерной, в общем случае n -мерной, плотности вероятности. Однако получение столь полных характеристик естественных фоновых помех оказывается очень сложной задачей, которая в настоящее время еще далека от практического решения [3]. Поэтому на практике обычно оперируют неполным набором статистических характеристик: математическим ожиданием, дисперсией, одномерной и двумерной спектральной плотностью мощности, автокорреляционной функцией, одномерным законом распределения энергетической яркости. При описании статистических взаимосвязей излучения естественных фонов в различных участках спектра пользуются взаимной корреляционной функцией.

Следует отметить, что однородный ансамбль реализаций фона с нормальным (гауссовым) законом распределения яркости полностью описывается автокорреляционной функцией или спектральной плотностью мощности. Этих характеристик вполне достаточно для анализа и синтеза оптимальных линейных пространственных фильтров, тем более, что при нормальном законе распределения нелинейные фильтры не могут дать лучший результат, чем линейные оптимальные фильтры [27].

Автокорреляционная функция и спектральная плотность мощности несут одинаковую информацию, так как они однозначно связаны преобразованием Фурье. Применение той или иной функции обусловлено лишь удобствами расчета. Одномерную пространственную спектральную плотность мощности можно получить из линий сканирования, а двумерную—из двумерных ИК-изображений случайного яркостного поля. Это компактный и эффективный способ представления данных, и проблемы, связанные с нахождением этих функций, подробно описаны в [19].

В случае негауссовых однородных ансамблей фонов при помощи спектральной плотности мощности можно оценить на выходе линейных звеньев оптико-электронной системы среднеквадратичный уровень шумов, обусловленных флуктуациями излучения фона, производить расчет системы на основе критерия, обеспечивающего максимальное отношение сигнала к шуму. Однако знания этой функции недостаточно для расчета нелинейных систем. Некоторую недостающую информацию может дать функция распределения энергетической яркости фона, например, величину максимального сигнала от фона, что позволяет правильно выбрать уровень ограничения в нелинейной системе обработки сигнала.

В общем случае характеристики излучения естественных фонов неоднородны по пространству и нестационарны во времени, что приводит к определенным трудностям при статистической обработке экспериментальных данных [14, 25, 26]. Однородность среднего значения яркости даже ясного дневного неба наблюдается лишь вблизи зенита при небольших углах возвышения Солнца [17, 18, 28]. При приближении к горизонту фон становится неоднородным, увеличиваются среднее значение яркости и перспективные искажения. Сам горизонт всегда добавляет нестационарный аспект к небесному фону. Неоднородность может наблюдаться по одной и отсутствовать по другой координате.

При изучении статистических характеристик мелкомасштабных пространственных флуктуаций яркости фона в некоторых случаях можно воспользоваться условием локальной однородности [29] и прибегнуть к описанию при помощи структурной функции. Важное свойство структурной функции состоит в том, что на её вид не влияют крупномасштабные флуктуации. Корреляционная же функция в равной мере учитывает флуктуации любого масштаба. Поэтому использование структурной функции, вместо корреляционной, физически оправдано в тех случаях, когда можно пренебречь крупномасштабными флуктуациями поля. Обсуждение различных аспектов, связанных с устранением или учетом влияния пространственной неоднородности и временной нестационарности случайных полей на их статистические характеристики, можно найти в [14, 29, 30].

Исследование статистических характеристик упрощается, если есть основания предположить изотропность изучаемых фонов даже в небольших пределах изменения координат (локальная изотропность). Условие изотропности позволяет фактически исключить из рассмотрения одну из переменных [5].

Для определения статистических характеристик фоновых помех необходим большой набор данных наблюдений—ансамбль реализаций. Получение ансамбля реализаций сильно усложняет экспериментальные исследования. Задача значительно облегчается, если, кроме предположения однородности и стационарности, есть основания ввести и предположение пространственно-временной или хотя бы пространственной эргодичности [29]. Эргодичность означает одинаковость (в вероятностном смысле) результатов усреднения как по совокупности реализаций, так и по одной реализации достаточно большой протяженности. В связи с этим целесообразно произвести разделение фонов на эргодические подансамбли, различающиеся физической природой фона (например голубое небо, сплошная облачность, лесной массив, поле и т. п.), пространственной макро- и микроструктурой, а также метеоусловиями наблюдения и условиями облучения фона светилami. Необходимым и достаточным условием эргодичности является затухание до нуля корреляционной функции в области, гораздо меньшей области наблюдения. Условие пространственной эргодичности соблюдается, очевидно, для ограниченного числа фонов. Если нет оснований вводить предположение об эргодичности фона, то можно использовать условие квазиэргодичности [29] и определить статистические характеристики путем усреднения по области, ограниченной определенным пространственным или временным масштабом изменения статистических характеристик (среднего значения, дисперсии и т. п.).

Для получения достоверных данных о статистических характеристиках случайного яркостного поля необходимо, чтобы в области наблюдения было достаточно большое число пространственных флуктуаций яркости. Реализации же яркостных полей всегда пространственно ограничены. Ограничения обычно обусловлены либо допустимыми интервалами изменения координат исследуемого поля, либо характер-

ным масштабом неоднородностей. Поэтому даже для однородных и стационарных эргодических полей возникают методические погрешности определения статистических характеристик [31, 32], причем при определении характеристик крупномасштабных флуктуаций они наибольшие. В случае недостаточной длины реализаций эти погрешности можно уменьшить путем усреднения статистических характеристик по нескольким реализациям, полученным в различные интервалы времени. Однако временная нестационарность естественных фонов затрудняет использование и этого способа.

Таким образом, вследствие пространственной неоднородности и временной нестационарности естественных яркостных фонов при экспериментальном определении статистических характеристик необходимо корректно выбирать условия для записи реализаций и методику расчета статистических характеристик, причем с обязательной оценкой методических погрешностей.

3. МОДЕЛИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ЯРКОСТИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ФОНОВ

Поскольку полных статистических характеристик флуктуаций мощности оптического излучения естественных фонов, полученных в результате прямых непосредственных измерений, пока не имеется, при расчетах оптико-электронных систем в качестве некоторого приближения пользуются эвристическими моделями фонов как со случайными, так и с неслучайными параметрами [5, 8, 33–51].

В природе встречаются неоднородные фоны с очень большими градиентами яркости, например, линия горизонта, граница облака и т. п. Для описания таких фонов служит эвристическая модель типа «ступени», в которой граница между двумя уровнями энергетической яркости прямолинейна, а разность этих уровней рассматривается как случайная величина, обладающая определенными математическим ожиданием и дисперсией [5].

Известна модель, имитирующая фоновые неоднородности, похожие по форме на объект, но отличающиеся большими размерами [5]. Она позволяет наглядно выявить селективность пространственного фильтра без учета возможных отличий форм неоднородностей фона и объекта.

Обе модели отображают лишь вполне определенные неоднородности фона. Поэтому желательна более сложная модель, отражающая вероятностные свойства фонов как случайных процессов и естественно включающая в себя характерные признаки вышеописанных моделей.

В первой такой модели небесного фона предполагалось, что облака и небосвод обладают постоянной излучательной способностью и температурой и что облака располагаются на однородном небосводе [38]. В этом случае имеются два уровня энергетической яркости: «белый» — более высокий уровень — для облака и «голубой» — более низкий — для холодного небосвода. Распределение же облаков по размерам было принято в соответствии с интуитивными представлениями, а именно: очень малые облака, как и очень большие, встречаются редко. Плотность вероятности $W(x)$, отражающая этот факт, и нормированная спектральная плотность мощности в одном измерении имеют следующий вид:

$$W(x) = 4xe^{-2x}; \quad (1)$$

$$S(\omega_x) = 8(\omega_x^2 + 8)/(\omega_x^4 + 64), \quad (2)$$

где x — относительная пространственная протяженность фонового импульса.

Первые двумерные эвристические модели случайного яркостного поля были построены на основе представления естественного яркост-

ного фона, например неба с частичной облачностью, в виде поля пространственных двумерных импульсов яркости со случайно распределенными длительностями и двумя неслучайными значениями амплитуд, соответствующими яркости облаков B_1 и ясного неба B_2 [39, 3, 40]. Так, в [40] фон моделируется двумерной случайной функцией $Z(x, y)$, построенной по следующему алгоритму: вдоль взаимно перпендикулярных осей наносятся точки, соответствующие значениям случайных чисел, образующих вероятностный процесс Пуассона; через эти точки проводят прямые, параллельные осям; их пересечения образуют систему прямоугольников, являющихся основаниями пространственных импульсов, расположенных в шахматном порядке, с периодически чередующимися высотами, равными выбранному уровню мощности оптического излучения. Корреляционная функция случайного процесса $Z(x, y)$, соответствующая этому квазиизотропному случайному процессу, имеет следующий вид:

$$K(\xi, \eta) = \sigma_z^2 \exp[-2\alpha(\xi + \eta)], \quad (3)$$

а спектральная плотность мощности

$$S(\omega_x, \omega_y) = (2/\pi) \sigma_z^2 (2\alpha)^2 [(\omega_x^2 + (2\alpha)^2) (\omega_y^2 + (2\alpha)^2)]^{-1}. \quad (4)$$

Чтобы вероятностные характеристики случайного процесса максимально приблизились к характеристикам естественного фона, значения $\sigma_z = (B_1 - B_2)/2$ и α выбираются, исходя из экспериментальных данных.

Подобные модели позволяют имитировать случайную яркость фона при помощи обычных диапозитивов, на которых изображаются реализации случайного процесса. Сам имитатор строится по простой оптической схеме. Источник инфракрасного излучения, например, модель абсолютно черного тела, равномерно подсвечивает диапозитив модели фона, а сменный нейтральный фильтр с определенным коэффициентом пропускания обеспечивает необходимый уровень излучения. Диапозитив располагается в фокальной плоскости объектива, который строит его изображение в бесконечности. Таким способом можно моделировать в поле обзора оптико-электронного устройства различное множество возмущающих воздействий и получать статистические оценки эффективности размерной селекции осуществляемой, например, путем логических нелинейных операций. В [41] описан метод получения диапозитива не только с заданной корреляционной функцией, но и с заданным двумерным законом распределения интенсивности излучения.

Дальнейшее развитие моделей типа «шахматной доски» шло по пути постепенного их усложнения с целью повышения степени изотропности, числа градаций яркости и т. д. [3]. Так, в [42] энергетическая яркость каждой точки поля является функцией двух независимых процессов $\varphi(x)$ и $\varphi(y)$, фиксированные реализации которых заданы по двум взаимно перпендикулярным осям. В качестве случайных процессов $\varphi(x)$, $\varphi(y)$ выбраны марковские разрывные процессы с двумя состояниями. Процессы $\varphi(x)$ и $\varphi(y)$ имели состояния a_1, a_2 и b_1, b_2 , соответственно, а интенсивности пуассоновских потоков в этих процессах были равными α_x, β_x и α_y, β_y , причем марковские процессы рассматривались в стационарном режиме. Для каждой пары значений аргументов x и y яркость B является функцией состояний a_i и b_j : $B = f(a_i, b_j)$ ($i, j = 1, 2$), т. е. в общем случае эта модель может быть двух-, трех- и четырехуровневой. Выбор функции $f(a_i, b_j)$ существенно влияет на вид корреляционной функции имитируемого случайного процесса. Изменением величин a_1, a_2, b_1, b_2 , а также $\alpha_x, \beta_x, \alpha_y, \beta_y$ можно приблизить корреляционную функцию модели к корреляционной функции реального фона. На основе этой модели был создан имитатор, в кото-

ром в качестве индикаторного устройства использовалась газоразрядная матричная панель типа «Паланга» с числом индикаторных элементов 10000. Схема управления позволяла получать движущуюся картину случайной фоновой реализации в нескольких направлениях с различными скоростями [42]. В [43] на основе методики построения модели в [44] были исследованы характеристики изотропных случайных полей, состоящих из непересекающихся пятен (кругов), яркость и величина которых случайны и независимы. Анализ выражений энергетического спектра привел к следующим выводам: а) спектральная плотность мощности процесса определяется в основном распределением коэффициента заполнения поля неоднородностями: она монотонно убывает с частотой при равномерном распределении, а при более сложных распределениях с ярко выраженным максимумом имеет максимум на частотах, отличных от нуля; б) в области высоких частот спектральная плотность падает обратно пропорционально кубу пространственной частоты, причем спектральная плотность тем больше, чем выше средний коэффициент заполнения.

Алгоритм построения статистической модели изотропного небесного фона в [45] был следующий. Фон представлен случайным рядом двумерных импульсов яркости, амплитуда которых подчиняется статистике Гаусса, а ширина — экспоненциальному закону:

$$W(B) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(B - \bar{B})^2}{2\sigma^2}\right], \quad W(r) = \sigma e^{-\alpha r}, \quad (5)$$

где r — расстояние между двумя смежными импульсами, α — величина, обратная средней ширине импульса. Если случайные процессы относительно B и r независимы, то автокорреляционная функция, двумерная и одномерная спектральные плотности мощности выражаются следующим образом:

$$K(\xi) = \sigma^2 e^{-\alpha|\xi|}; \quad (6)$$

$$S(\omega_x, \omega_y) = 2\pi\alpha\sigma^2 / (\alpha^2 + \omega_x^2 + \omega_y^2)^{3/2}; \quad (7)$$

$$S_x(\omega_x) = 4\alpha\sigma^2 / (\alpha^2 + \omega_x^2). \quad (8)$$

В этой же работе на основании анализа экспериментальных данных вместо (5) предлагается более общее выражение для плотности вероятности суммарной радиации фона, включающей в себя как отраженное, так и собственное излучения, описываемые, по утверждению авторов [45], экспоненциальным $W(B) = (1/m_p)\exp(-B/m_p)$ и нормальными законами соответственно,

$$W(B_\Sigma) = \frac{1}{m_p \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{\sigma_g^2}{2m_p^2} - \frac{B_\Sigma - m_g}{m_p}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{\sigma_g}{m_p \sqrt{2}} - \frac{B_\Sigma - m_g}{\sigma_g \sqrt{2}}\right), \quad (9)$$

где m_p — средняя энергетическая яркость отраженного излучения, m_g, σ_g^2 — среднее значение и дисперсия яркости собственного излучения, $\operatorname{erfc}(x) = \int_x^\infty e^{-t^2} dt$ — табличный интеграл. Недостатком этой модели является зависимость $W(B_\Sigma)$ от частных параметров m_p, m_g, σ_g^2 , а не от суммарных — $m_\Sigma, \sigma_\Sigma^2$.

Поэтому в [46] экспериментальные данные предлагается аппроксимировать в виде суммы квадратов двух гауссовых случайных процессов, плотность вероятности такого процесса имеет вид

$$W(B_{\Sigma}) = \frac{1}{2\sigma_{\Sigma}} \exp\left(-\frac{B_{\Sigma} + m_{\Sigma}}{2\sigma_{\Sigma}}\right) J_0\left(\frac{\sqrt{B_{\Sigma} m_{\Sigma}}}{\sigma_{\Sigma}}\right), \quad (10)$$

где $J_0(x)$ — модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка. Согласно [46] такой закон хорошо аппроксимирует распределения яркостей, наблюдавшиеся экспериментально в [45, 47, 48].

Модель двухкомпонентного фона (облака на фоне Земли или неба), построенная на основе определенных геометрических представлений о распределении объектов, образующих яркостное поле с учетом их спектральных характеристик, рассмотрена в [49]. В этой модели кусочно-постоянного случайного поля предполагается, что центры фигур-объектов (облаков), расположенные в плоскости, распределены по закону Пуассона, а ориентация фигур чисто случайна. Вероятность того, что любая данная точка поля принадлежит Земле, полагается равной $P = e^{-\gamma S}$, где S — средняя площадь облака, а γ — среднее число облаков, приходящихся на единицу площади. Случайное поле, построенное таким образом, однородно и изотропно. Полученные при самых общих предположениях корреляционные функции поля спектральной яркости $K(r, \lambda_1, \lambda_2)$ и поля интегральной яркости $K(r)$ аппроксимируются с помощью более простой экспоненциальной функции вида $K(r) = \sigma^2 e^{-|r|/\rho}$, так что после преобразований корреляционная функция двухкомпонентного случайного яркостного поля типа Земля—облака $K(r, \lambda_1, \lambda_2)$ выражается через вторые моменты пространственных флуктуаций яркости Земли и облаков и простые геометрические параметры: средняя площадь и периметр облаков и балльность облачности. Основным достоинством такой модели, по мнению автора, [49], является возможность выразить корреляционную функцию поля через его физически измеряемые характеристики.

Введением каскадного случайного процесса, т. е. подчиненного процесса, построенного на основе другого случайного процесса (первичного), в [50] предложена модель двумерного случайного яркостного поля «импульсного» типа, позволяющая имитировать нестационарность и неоднородность естественных фонов. В качестве исходных элементов поля выбраны пятна постоянной яркости (или прозрачности), одинаковой площади и с произвольно выделенным центром. Предполагается, что распределение центров этих пятен в произвольной области D площадью $S(D)$ удовлетворяет условиям однородности, отсутствия последствия и задает первичный процесс $V(D)$. В этом случае вероятность попадания в область D k центров определяется законом Пуассона

$$W_k[S(D), \lambda] = \frac{[\lambda S(D)]^k}{k!} e^{-\lambda S(D)}, \quad (11)$$

где λ — среднее число центров на единичной площади. Угол поворота пятен распределен равномерно. Если рассматривать случай перекрывающихся прозрачных пятен с коэффициентом пропускания α ($0 \leq \alpha \leq 1$), расположенных на равномерном яркостном фоне, то коэффициент пропускания $T_{\alpha}(A)$ в заданной точке A равен $T_{\alpha}(A) = \sigma^k$. При этом $T_{\alpha}(A)$ есть двумерное случайное поле, подчиненное процессу $V(D)$. На основе введенных предположений излагается методика расчета первых и вторых статистических моментов моделируемого поля как для детерминированных значений α , так и для случайных с распределением $k(\alpha)$. Отличительной особенностью рассмотренного подхода является возможность приближения вероятностных характеристик модели к свойствам реальных полей не только изменением параметров модели

λ , S , $k(\alpha)$, но и изменением распределения состояний основного процесса $V(D)$. По мнению авторов, изменением $V(D)$ можно моделировать типичные виды временной нестационарности и пространственной неоднородности естественных яркостных полей.

Следует отметить, что неоднородность естественных яркостных полей можно моделировать также при помощи аддитивно-мультипликативных нестационарных случайных функций [14]:

$$B(r) = \sigma(r) b(r) + m(r), \quad (12)$$

где $b(r)$ — однородное в широком смысле случайное поле с математическим ожиданием $m_b = 0$ и дисперсией $\sigma_b^2 = 1$, а $m(r)$ и $\sigma(r)$ — некоторые функции неслучайной природы, интерпретируемые соответственно как текущие математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение.

Изотропные яркостные поля встречаются редко, поэтому целесообразно рассматривать локальную изотропность полей [51]. Если структурная функция изотропной модели фона имеет вид

$$C(r) = 2 [K(0) - K(r)] = 2\sigma^2 (1 - e^{-r/r_\phi}),$$

где r_ϕ — радиус корреляции, то структурная функция локально-изотропной модели фона, для которой $r < r_\phi$, получается путем ограничения первыми двумя членами разложения в степенной ряд $\exp(-|r|/r_\phi)$ в более простом виде: $C(r) = 2\sigma^2 |r|/r_\phi$.

Для оптико-электронной системы обнаружения точечного излучателя, состоящей из оптической части, раstra модулятора, фотоприемника, сканирующего устройства и последующего электронного тракта обработки периодической последовательности видеоимпульсов, теоретически было показано в [51], что в случае значительного превышения средних размеров фоновых образований над разрешающей способностью оптической системы отношение сигнал/шум на выходе системы не зависит от принимаемой модели фона (изотропной или локально-изотропной); если же средние размеры фоновых образований соизмеримы с разрешающей способностью оптической системы, то изотропная модель соответствует большему отношению сигнал/шум, чем локально-изотропная, и в этом смысле представление фона моделями изотропной или локально-изотропной существенно.

Таким образом, в научно-технической литературе уже описано достаточно много гипотетических моделей излучения естественных яркостных полей. Развитие эвристического моделирования фонов шло по пути постепенного усложнения моделей, исходя из имеющихся немногочисленных экспериментальных данных. Поэтому количественно оценить степень достоверности отражения предлагаемыми моделями характера оптического излучения естественных фонов пока затруднительно, и такой оценки не делается ни в одной работе. Качественное же согласие предложенных моделей с имеющимися экспериментальными характеристиками обсуждается лишь в [45, 46]. Отсутствие достаточно надежных статистических моделей вынуждает разработчиков ОЭС прибегать к имитированию реальных яркостных полей с помощью физических моделей естественных фонов. Например, в штате Аризона службой электрооптических испытаний созданы макеты протяженных фонов типа ландшафта и небосвода, выполненные в масштабе 1:60 [52]. Приближения этих макетов к естественным фонам добиваются путем специальной окраски, искусственного подогрева или охлаждения, перемещения и т. п. Такие модели, очевидно, не могут отразить все встречающееся многообразие фоновых ситуаций. Получение же экспериментальных данных, описывающих в достаточно полной мере естест-

венные фоновые помехи, представляет сложную задачу не только из-за ее большой трудоемкости, но и из-за ряда особенностей, присущих излучению яркостных фонов, которые будут обсуждаться ниже.

4. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ФОНОВЫХ ПОМЕХ

Экспериментальные исследования характеристик излучения естественных яркостных фонов в разное время проводились как за рубежом, так и в СССР. Впервые яркостное поле как случайную функцию пространственных координат рассматривал Джонсон [53]. В дальнейшем такое представление принималось при измерениях основных статистических характеристик различных фоновых образований.

Первые экспериментальные данные были получены в области спектра 1—24 мкм при помощи двухканального радиометра с чувствительностью $3 \cdot 10^{-12}$ Вт, сканирующего вблизи горизонта одновременно фон неба и морской поверхности [54]. Излучение фонов фокусировалось на два ленточных чувствительных слоя болометра: на одну—от неба, а на другую—от моря. Каждая из болометрических полосок стягивала по вертикали угловое поле в $0^{\circ},5$, а по горизонтали— $0^{\circ},25$. Спектральная плотность мощности шумов фона измерялась спектроанализатором на пространственных частотах 7,1; 14; 27; 53; 91 (1/рад). Нижняя пространственная частота ограничивалась размером сканируемого участка фона, составляющего 100° , а верхняя—пространственным разрешением радиометра. Усреднение одномерных спектральных плотностей мощности по данным измерений в течение 12 ночей 1956 г. и 11 ночей 1957 г. показало, что для моря и неба у горизонта они имеют одинаковый ход, обратно пропорциональный пространственной частоте в степени 1,7, а величина флуктуаций небесного фона была в ~ 3 раза больше, чем моря. Средние месячные спектральные плотности мощности флуктуаций небесного фона и моря имели показатели степени у пространственной частоты, изменяющиеся от 1 до 3,5.

В дальнейшем исследования флуктуаций яркости неба вблизи морского горизонта проводились путем сканирования небосвода по растру с расстояниями между строками $0^{\circ},5$ в секторе углов возвышения $0—15^{\circ}$ и азимутальных углов $0—115^{\circ}$ [55–58]. Экспериментальная установка имела мгновенное угловое поле $10 \times 10'$ и располагалась на морском побережье (на высоте 35 м над уровнем моря), скорость сканирования изменялась от 2 до 10° в секунду.

Относительные измерения энергетической яркости производились летом в дни с частичной и сплошной неоднородной облачностью на длинах волн $\lambda = 0,58$ ($\Delta\lambda = 0,006$); 1,06(0,01); 1,6(0,05); 2,2 (0,05); 3,7(0,075) и 4,6(0,15) мкм. Экспериментальные плотности вероятности флуктуаций яркости пригоризонтного фона имели значительные отклонения от нормального закона. В спектральных областях от 0,58 до 2,2 мкм в основном наблюдалась левосторонняя асимметрия гистограмм (мода находилась левее среднего значения), а в более длинноволновых областях—правосторонняя, что обусловлено сменой физического механизма излучения. Степень отклонения от нормального закона возрастала с увеличением угла возвышения и была максимальной для частичной облачности.

Среднеквадратичные значения флуктуаций яркости росли с увеличением длины волны, достигая максимума при $\lambda = 2;2$ мкм (примерно вдвое большие значения, чем при $\lambda = 0,58$), а затем резко уменьшались и при $\lambda = 4,6$ мкм составляли 0,05 от максимального значения.

Минимальные радиусы корреляции пространственных флуктуаций яркости (по данным авторов 6—7 угл. град) наблюдались в спектраль-

ном диапазоне 0,58—2,2 мкм для частичной облачности при углах возвышения 8—15°. В более длинноволновом излучении фона можно было выделить два процесса: первый имел радиус корреляции 6—7 угл. град, а второй—в 4—5 раз больший, что, по мнению авторов, связано с неоднородностью оптического излучения. У линии горизонта радиус корреляции флуктуаций излучения небосвода при частичной облачности возрастал примерно в три раза, а радиус корреляции при сплошной неоднородной облачности всегда был больше, чем при частичной. Рассчитанные по корреляционным функциям спектральные плотности мощности уменьшались с частотой. При их аппроксимации зависимостью $S(\omega_x) = \omega_x^{-n}$ коэффициент n изменялся от 1,3 в видимой области до 3,2 при $\lambda = 3,7$ мкм.

Некоторые данные о яркостном контрасте линии видимого морского горизонта можно найти в [56, 58, 59], а о флуктуациях яркости излучения, отраженного взволнованной водной поверхностью, в [25, 60, 61].

Яркость фона—ясное небо—во всех окнах прозрачности атмосферы возрастает при визировании в направлении горизонта [3, 6, 22, 23, 25, 28, 62—67]. Причем на длинах волн, больших ~ 4 мкм, где преобладает собственное излучение атмосферы, наиболее сильна зависимость яркости небосвода от угла возвышения, а на длинах волн, меньших ~ 3 мкм, где преобладает рассеянное солнечное излучение, наблюдается сильная зависимость яркости и от азимута, обусловленная положением Солнца. Минимум яркости находится в противосолнечном вертикале. При восходе или заходе Солнца область наименьшей яркости находится в зените, а по мере поднятия Солнца над горизонтом область минимальной яркости опускается по вертикалу вниз. Ближе к Солнцу яркость сильно возрастает; в области спектра 2—3 мкм уже на азимутальных расстояниях $\sim 15^\circ$ от Солнца она может в сотни раз превышать минимальную яркость [28]. Данные по абсолютным измерениям зависимости спектральной яркости ясного небосвода от угла возвышения и азимута можно найти в [3, 6, 22, 23, 25, 62—69], а интегральной яркости в спектральных участках 0,55 ($\Delta\lambda = 0,02$); 1,02 ($\Delta\lambda = 0,04$); 1,22 ($\Delta\lambda = 0,05$); 1,64 ($\Delta\lambda = 0,07$); 1,8—2,5; 3,7—4,1; 4,5—5,1; 8,4—9,4 мкм—в [28, 70—74]. Амплитуда флуктуаций яркости ясного небосвода обычно во много раз меньше среднего значения [28]. Поэтому даже небольшие изменения средней яркости вызывают неоднородность небесного фона. Это необходимо учитывать при выборе методики определения статистических характеристик флуктуаций излучения ясного небосвода.

В [28] по результатам многолетних измерений были выделены участки небосвода в области зенита ($\varepsilon > 70^\circ$), излучение которых при небольших углах возвышения Солнца ($\varepsilon_c < 15^\circ$) рассматривалось как однородное случайное поле. Поэтому статистические характеристики рассчитывались с помощью методики, применяемой для анализа стационарных случайных процессов. На основании такого подхода в течение ряда лет были исследованы статистические характеристики пространственных флуктуаций яркости выделенной области ясного небосвода [28, 75—79]. Реализации пространственных флуктуаций яркости, полученные путем сканирования радиометром вдоль азимута, записывались на ленту самописца и в дальнейшем вводились в ЭВМ [80]. Шаг дискретизации составлял 0,08 угл. град, а угловое поле радиометра составляло 17 минут. С помощью ЭВМ по стандартной методике рассчитывались моментные функции первого и второго порядков, спектральная плотность мощности и интегральный закон распределения яркости пространственных флуктуаций излучения. Проверка на соответствие интегрального закона распределения яркости нормальному проводилась с помощью вероятностной бумаги [81] и показала, что флуктуации яркости большинства реализаций ($\sim 70\%$) приближенно

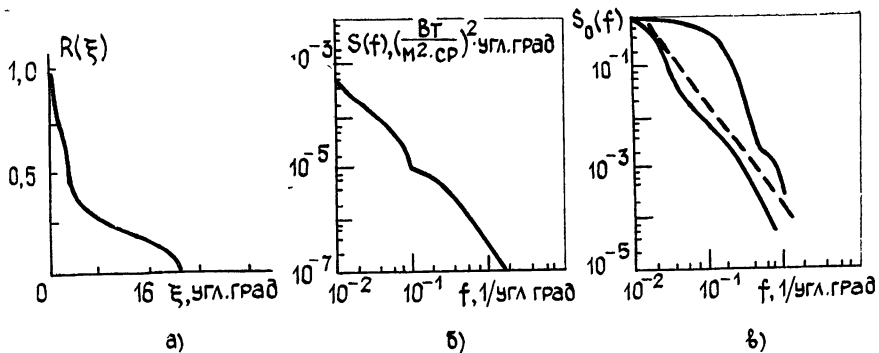


Рис. 1.

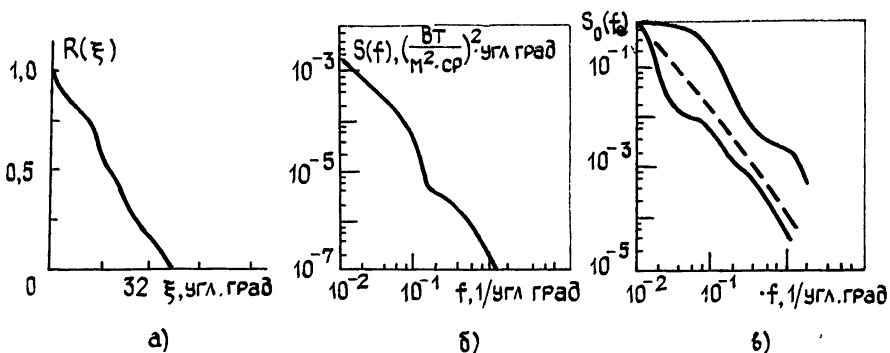


Рис. 2.

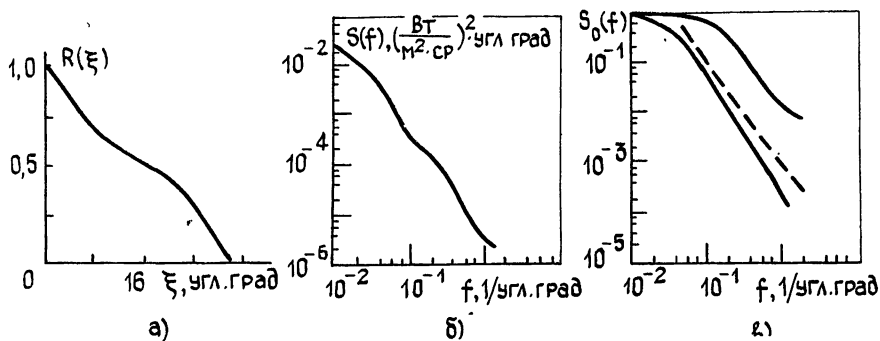


Рис. 3.

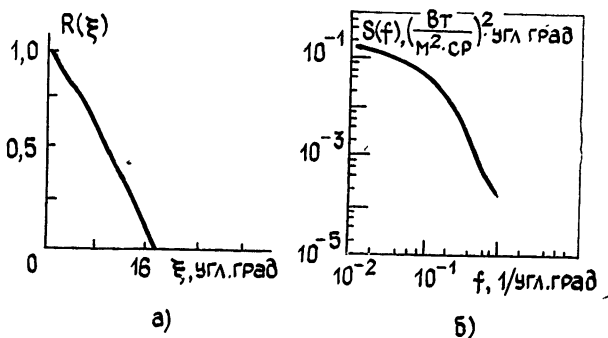


Рис. 4.

подчиняются нормальному закону. На рис. 1—4 представлены коэффициенты автокорреляции (а) и спектральные плотности мощности (б) для наиболее типичных реализаций в спектральных диапазонах 1,8—2,5 (рис. 1); 3,7—4,1 (рис. 2); 4,5—5,1 (рис. 3); 8,4—9,4 мкм (рис. 4) [28]. (Кривые спектральной плотности мощности построены при $m=0,03; 0,09; 0,33; 1,3 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ср}$ и $\sigma^2=2 \cdot 10^{-5}; 1,6 \cdot 10^{-5}; 4,4 \cdot 10^{-4}; 8,1 \cdot 10^{-3} (\text{Вт/м}^2 \cdot \text{ср})^2$ на рис. 1, 2, 3, 4 соответственно.) Для спектральной плотности мощности характерно наличие кроме основного максимума в области частот 0,01—0,04 1/угл. град побочного максимума в области 0,2—0,5 1/угл. град [75, 76]. Спектр оказывается как бы состыкованным из двух спектров с разными скоростями убывания с частотой [76].

Особенностью флуктуаций яркости ясного небосвода является то, что их амплитуда обычно на порядки меньше среднего значения яркости. Поэтому, несмотря на то, что относительные вариации средней яркости $\Delta B_{\text{ср}}/B_{\text{ср}}$ малы, амплитуда этих вариаций $\Delta B_{\text{ср}}$ намного превышает амплитуду мелкоструктурных флуктуаций, обуславливая тем самым неоднородность небесного фона. При стандартной методике определения статистических характеристик это обстоятельство приводит к частичной потере информации о флуктуациях яркости. Наблюдается маскировка статистических характеристик мелкоструктурных флуктуаций более мощными крупномасштабными вариациями. Например, коэффициенты автокорреляции (рис. 1—4 а) описывают главным образом крупномасштабные пространственные вариации яркости, характеризующиеся довольно большим радиусом корреляции и сильной зависимостью его от длины волны (рис. 2—4 а). Наблюдавшееся увеличение радиуса корреляции с уменьшением длины волны от ~ 9 до ~ 4 мкм обусловлено возрастанием вклада рассеянного солнечного излучения, приводящего к усилению зависимости яркости фона от азимута [28], т. е. к неоднородности фона. Таким образом, из вида спектральной плотности мощности и коэффициента автокорреляции можно заключить, что низкочастотные составляющие спектра в основном обусловлены квазидетерминированной зависимостью средней яркости ясного небосвода от азимута, а случайные флуктуации излучения вносят существенный вклад, начиная с частот 0,2—0,5 1/угл. град.

Поскольку яркость ясного небосвода зависит от ряда факторов (высоты Солнца, прозрачности атмосферы, влажности, температуры и т. п.), их временные изменения вызывают вариации статистических характеристик флуктуаций излучения. На рис. 1в—3в приведены границы изменения нормированной к единице спектральной плотности мощности пространственных флуктуаций яркости ясного неба вблизи зенита. Сплошными линиями показаны границы изменения, а штриховыми — средние спектральные плотности мощности [75—78]. Число реализаций, по которым проводилось усреднение, равнялось 15, 16 и 7 для спектральных областей 1,8—2,5; 3,9—4,2; 4,5—5,2 мкм соответственно. Таким образом, вариации условий наблюдения вызывали изменение показателя степени у пространственной частоты в пределах 1,3—2,3 и 1,74—2,35 для спектральных областей 1,8—2,5 [75] и 3,9—4,2 мкм [76]. Для аппроксимации усредненных статистических характеристик в [76—79] применялась математическая модель, описанная ранее в [45] (см. (5)—(8)). Измеренные средние значения коэффициента α оказались равными 0,063 и 0,057 1/угл. град для спектральных областей 1,8—2,5 и 3,9—4,2 мкм [79].

Коэффициенты взаимной корреляции $R_{12}(0)$ пространственных флуктуаций излучения ясного полуденного небосвода, полученные для различных спектральных участков при азимутальном сканировании, представлены в табл. 1 [82]. Взаимная корреляция наблюдалась наибольшей в тех окнах прозрачности, где яркость небосвода обусловлена

Таблица 1

Коэффициенты взаимной корреляции пространственных флуктуаций яркости фонов в различных спектральных областях

| Фоны | Условия наблюдения | Сочетание спектральных областей | | | | | |
|-----------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | 2—3 мкм и 3—4 мкм | 2—3 мкм и 4—5 мкм | 2—3 мкм и 8—14 мкм | 3—4 мкм и 4—5 мкм | 3—4 мкм и 8—14 мкм | 4—5 мкм и 8—14 мкм |
| Фон небосвода | полдень, безоблачное небо | 0,4 | 0,24 | 0,15 | 0,20 | 0,18 | 0,70 |
| Фон лесов и гор | полдень, безоблачное небо | 0,74 | 0,61 | 0,54 | 0,66 | 0,55 | 0,85 |
| | полдень, облачное небо | 0,74 | 0,71 | 0,57 | 0,68 | 0,73 | 0,85 |
| Фон города | полдень, безоблачное небо | 0,70 | 0,33 | 0,27 | 0,36 | 0,30 | 0,54 |
| | полдень, облачное небо | 0,75 | 0,43 | 0,37 | 0,54 | 0,62 | 0,80 |

одним механизмом—или собственным излучением атмосферы, или рассеянным излучением Солнца. По мере увеличения спектрального интервала между окнами она уменьшалась.

Облачные образования являются весьма интенсивными источниками отраженного излучения. Они создают многочисленные помехи различным ОЭС. Характер флуктуаций яркости облачных образований зависит от их вида, мощности, направления визирования, от спектральной области и условий облучения светилами [23, 26, 83—98].

Дисперсия пространственных флуктуаций яркости облачности в видимой области спектра зачастую имеет максимум при угле возвышения $\theta = 50\text{—}70^\circ$, обусловленный наибольшей яркостью освещенных Солнцем боковых частей облаков в этом направлении [26]. В ближней ИК-области спектра (до ~ 3 мкм) наблюдается сильная зависимость яркости облаков от длины волны, типа облаков и их толщины. Например, при $\lambda = 2$ мкм спектральная яркость облаков может изменяться более чем на два порядка [23]. Данные о спектральной яркости и альbedo облаков различных типов в зависимости от их толщины можно найти в [23, 83]. Коэффициент излучения облаков с увеличением их толщины быстро приближается к единице [84, 85]. Например, в спектральном диапазоне 8—12 мкм при толщине слоистых облаков 140—170 м, а высоко-кучевых— 360—480 м коэффициент излучения равен 0,99 [85]. Поэтому в тех участках спектра, где преобладает собственное излучение, вариации яркости облачных образований при изменении характера облачности не превышают 50%. Например, в спектральной области 3,9—5,2 мкм яркость небосвода, затянутого сплошной облачностью с нижней границей от поверхности Земли менее 200 м, не зависит ни от азимута, ни от угла возвышения и равна яркости абсолютно черного тела при температуре облаков [70, 71]; при сплошной облачности среднего и верхнего ярусов наблюдается уменьшение яркости с увеличением угла возвышения, и в зените ее значение примерно в два раза меньше, чем в горизонтальном направлении [71].

Достаточно полных данных о функции распределения, да и о других статистических характеристиках флуктуаций яркости облаков при наблюдении с Земли не имеется, известны лишь некоторые частные результаты.

Например, согласно [88] в спектральной области 8—12 мкм для слоистой облачности характерен нормальный закон, а для высококучевых облаков и облаков вертикального развития— сложное распределение с двумя-тремя максимумами. В спектральной области 2—5 мкм функция распределения излучения облаков аппроксимируется логарифмически нормальным законом [89], а в видимой области она сильно отличается от нормального закона и для разорванной кучевой облачности имеет бимодальную форму [26, 90].

В [91—97] в течение нескольких лет с поверхности Земли при помощи быстродействующего радиометра [26, 94], имеющего пространственное разрешение $4 \times 4'$, путем сканирования по окружности радиусом 5° с частотой 7 Гц или более медленного сканирования вдоль горизонта исследовались статистические характеристики пространственных флуктуаций излучения облачности в диапазоне 8—12 мкм. Диспер-

Таблица 2

Зависимость среднеквадратичного значения флуктуаций яркости кучевых облаков от угла возвышения и балльности облачности

| Угол возвышения, угл. град | Среднеквадратичное отклонение, Вт/м ² · ср | | |
|-------------------------------|---|-----|------|
| | Балл облачности | | |
| | 1—3 | 4—6 | 7—9 |
| 0—40 | 2,1 | 3,7 | 2,1 |
| 40—60 | 1,9 | 3,0 | 1,5 |
| 60—80 | 1,3 | 1,5 | 0,66 |

сия и автокорреляционная функция вычислялись на ЭВМ, а спектральная плотность мощности определялась с помощью спектроанализатора С5-3 с полосой пропускания 6 Гц. Дисперсия кучевой облачности возрастала с увеличением угла возвышения [91, 92], а ее наибольшие значения наблюдались днем при балльности облачности 4—6 и углах возвышения, больших 50° [91] (см. табл. 2). Радиус корреляции также возрастал с углом возвышения θ , что связано с увеличением угловых размеров яркостных неоднородностей вследствие сокращения расстояния до них; при этом его величина, определенная по половинному уровню $R(\xi)$, не превышала 2°,5 (рис. 5а).

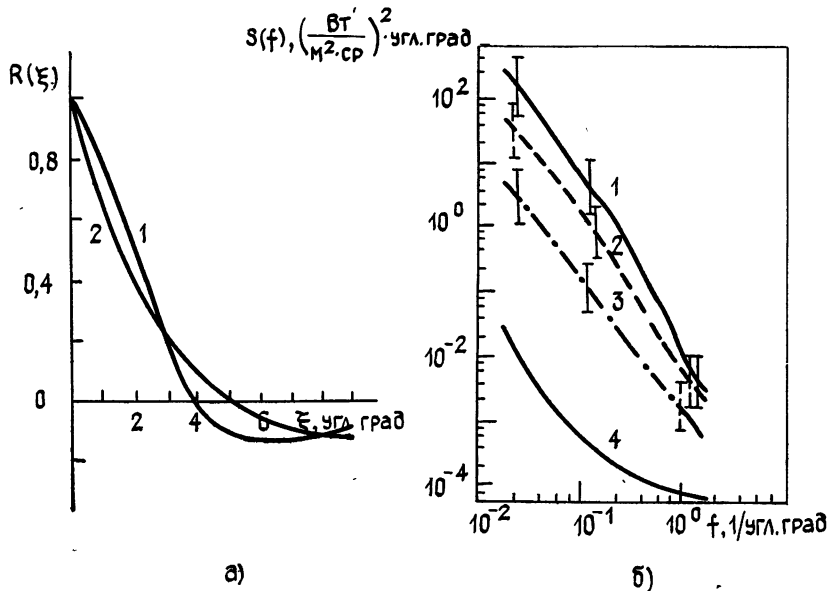


Рис 5 Усредненные коэффициенты корреляции кучевых облаков а) (1— $\Delta\lambda = 8,5-12,5$ мкм, $\theta=25^\circ$, 2— $\Delta\lambda=10,2-11,5$ мкм, $\theta=10^\circ$) и спектральные плотности мощности б) для кучевой (1), высококучевой (2) и перистокучевой (3) облачности при $\theta=0-70^\circ$, 4—шум аппаратуры.

Спектральная плотность мощности пространственных флуктуаций яркости облаков в области 8—12 мкм практически не зависит от азимута [26, 92, 94], при углах возвышения 30—60° облачные поля в этой спектральной области можно считать изотропными [97]. Влияние типа облачности на спектральную плотность мощности показано на рис. 5б [26, 91, 92, 93—95]. Ее можно аппроксимировать выражением [25]

$$S(f) = S(f_1)/(f^{s_0+s_1gf}),$$

где $S(f_1)$ — мощность основной гармоники, $f_1 = 0,033$ 1/угл.град, s_0 и s_1 — эмпирические постоянные для данного типа облачности (табл. 3). Независимо от типа облачности при небольших углах возвышения наблюдался более сильный спад высокочастотных составляющих спектров, чем для углов, близких к зениту. Это, по-видимому, обусловлено влиянием слоя атмосферы между облаками и пунктом наблюдения, а также эффектом затенения [26] при визировании вблизи горизонта. Спектральная плотность мощности в коротковолновой ИК-области 1,44—1,74 мкм затухает слабее, чем в длинноволновой, и приблизительно пропорциональна $1/\omega^{5/3}$ [92]. Мощность флуктуаций яркости облачных образований, освещенных Солнцем, была больше, чем у неосвещенных, независимо от спектрального диапазона. В спектральной области, где преобладает собственное излучение облаков, это обусловлено большими температурными градиентами на освещенной стороне облаков вследствие

вие поглощения солнечной энергии и более сильного турбулентного перемешивания. В ночное время мощность флуктуаций собственного излучения облаков по данным [26] была меньше, чем днем, а по данным [45] оставалась неизменной (табл. 4).

Таблица 3

Характеристики спектральных плотностей мощности пространственных флуктуаций яркости облачного неба

| Тип облачности | Среднее значение яркости, $Bm/м^2 \cdot ср$ (при углах возвышения) | $S(f_1), \left(\frac{Bm}{м^2 \cdot ср}\right)^2 \times \text{угл} \text{ град}$ | s_0 | s_1 |
|----------------|--|---|-------|---------|
| Ск | 8—16 ($\theta \geq 15^\circ$) | 4,47 | 2,27 | + 0,16 |
| Ас | 6—13 ($\theta \geq 20^\circ$) | 1,07 | 2,09 | + 0,10 |
| Ск, Сс | 1,5—7 ($\theta \geq 30^\circ$) | 0,126 | 2,24 | - 0,096 |
| Шум аппаратуры | $1,5 \cdot 10^{-2}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | 1,73 | - 0,28 |

В видимой области спектра (0,4—0,6, штриховая кривая; 0,6—0,8 $\mu\text{м}$, сплошная кривая) при визировании в направлениях, образующих различные углы β с направлением на Солнце, но одинаковый угол возвышения ($\theta = 45^\circ$), спектральная плотность мощности яркости облаков верхнего (1, $\beta = 60^\circ$) и нижнего ярусом (2, $\beta = 90^\circ$) представлена на рис. 6 [98].

Взаимная корреляция между пространственными флуктуациями яркости облачных образований в коротковолновой (1,44—1,74 $\mu\text{м}$) и длинноволновой (8,4—12,5 $\mu\text{м}$) областях спектра при небольших углах возвышения зависит от угла β между направлением на Солнце и направлением на облако [96]. Для интервалов углов $\beta = 30\text{--}60^\circ$, $60\text{--}90^\circ$ и $\beta > 90^\circ$ коэффициенты взаимной корреляции $R_{12}(0)$, усредненные по 30—50 реализациям кучевой облачности, оказались равными 0,53; 0,58; 0,78 [96]. Уменьшение корреляции при уменьшении β объясняется экранированием солнечного излучения, падающего на наблюдаемый участок, другими частями облаков. Для плотной сплошной слоистой облачности коэффициент взаимной корреляции положителен и невелик, а для просвечивающейся принимает отрицательные значения. Отрицательная корреляция объясняется тем, что с уменьшением оптической толщины облака рассеянное солнечное излучение увеличивается, а собственное уменьшается.

Усредненные за длительный период времени статистические характеристики пространственных флуктуаций яркости небосвода с частичной облачностью, а также леса и города в спектральных областях 2,0—3,0; 3,1—4,0; 4,6—4,9; 7,6—14,0 $\mu\text{м}$ (области оценены по половинному уровню пропускания примененных оптических фильтров) приведены в [45, 86, 87]. Полосы пропускания фильтров не совсем точно совпадали с соответствующими окнами прозрачности атмосферы, но, по мнению авторов, это обстоятельство несущественно для исследо-

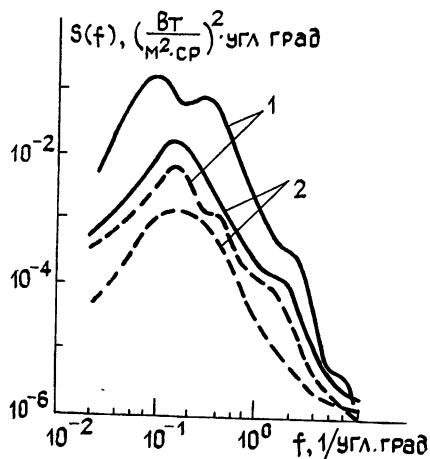


Рис. 6.

Таблица 4

Среднеквадратичные значения пространственных флуктуаций излучения небосвода, леса, города

| Спектральная область, мкм | Фон неба | | | | Фон леса | | | Фон города | | |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------|-------------------|-------------------|-------|-------------------|-------------------|-------|-------------------|
| | Частичная облачность (день) | Частичная облачность (ночь) | Ночь | Ясное небо (день) | Облачность (день) | Ночь | Ясное небо (день) | Облачность (день) | Ночь | |
| | | | | | | | | | | Ясное небо (день) |
| 2,0—3,0 | 3,2 | — | — | 0,4 | 0,12 | — | 1,18 | 0,1 | 0,031 | |
| 3,1—4,0 | 0,32 | — | — | 0,26 | 0,17 | 0,16 | 0,56 | 0,2 | 0,05 | |
| 4,6—4,9 | 0,18 | 0,18 | 0,09 | 0,05 | 0,05 | 0,048 | 0,33 | 0,31 | 0,1 | |
| 7,6—14,0 | 19,2 | 19,2 | 0,45 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 4,2 | 2,6 | 0,81 | |

Примечание: — указывает, что для этих условий среднеквадратичные отклонения не были получены, так как уровень лучистого потока от фона маскировался шумами радиометра. Размерность среднеквадратичного отклонения ($Bт/м^2 \cdot ср$).

вания статистических характеристик фонов. Измерения проводились в течение десяти лет (с 1963 по 1973 гг.) во всех погодных условиях, кроме дождя [45]. Оптическое излучение фона собиралось полукассетно-резовским объективом, диаметр которого составлял 400 мм, а фокусное расстояние—600 мм. Мгновенное поле зрения радиометра составляло 3 мрад. Механизм сканирования обеспечивал автоматическое сканирование в горизонтальной плоскости в диапазоне углов $-100-+100^\circ$ со скоростью 0,05 рад/с. Электрический сигнал с радиометра поступал на осциллограф и после аналого-цифрового преобразования вводился в ЭВМ для расчета дисперсии, одномерной плотности вероятности, вероятности распределения ширины импульсов от фоновых неоднородностей и одномерной спектральной плотности мощности. Шаг дискретизации составлял 4 мрад (14 угл. минут), а амплитуда сигнала квантовалась на 200 уровней.

Во время многочисленных измерений энергетической яркости фонов температура окружающей среды изменялась от 0 до $+30^\circ\text{C}$, а влажность от 30 до 90%.

Распределения амплитуды флуктуаций излучения небосвода с частичной облачностью в спектральной области 8—14 мкм подчинялись нормальному закону, а в спектральных областях, где преобладало рассеянное солнечное излучение,—экспоненциальному. Если же собственное и отраженное излучения сравнимы по величине, то плотность вероятности можно было аппроксимировать плотностью вероятности суммы двух процессов, имеющих нормальное и экспоненциальное распределения (9).

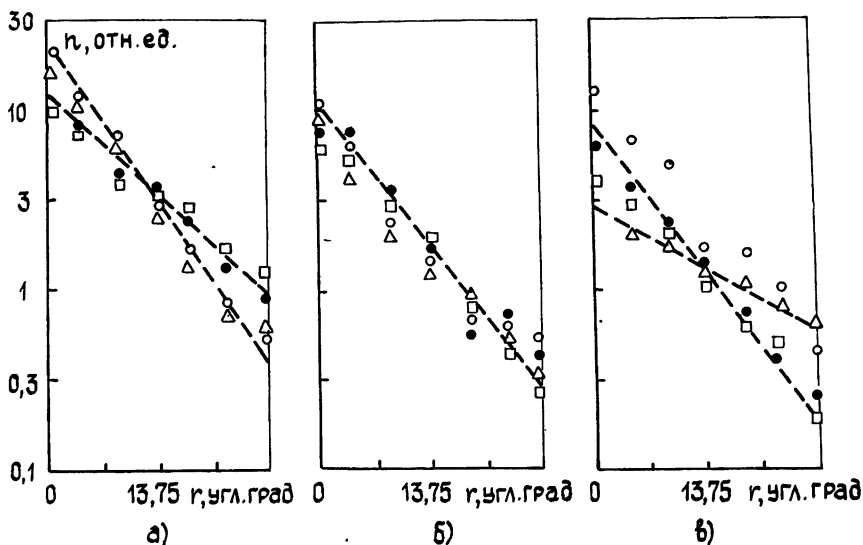


Рис. 7 Распределение ширины импульсов а) фона неба, б) фона леса, в) фона города в спектральных областях:
 ○○○ — 2,0 — 3,0 мкм; ●●● — 3,1 — 4,0 мкм; □□□ — 4,6 — 4,9 мкм;
 △△△ — 7,6 — 14,0 мкм.

В соответствии с принятой в [45] статистической моделью фона как совокупности пространственных импульсов энергетической яркости, различных по амплитуде и ширине, проводились измерения пространственной протяженности шумовых импульсов облачного небосвода вдоль линии сканирования. В основном наблюдался экспоненциальный закон распределения (5) импульсов энергетической яркости облаков по ширине (рис. 7а) в соответствии со значениями параметра α , при-

веденными в табл. 5. Примерно такие же значения α в спектральной области 1,8—2,5 и 3,9—4,2 мкм приведены в [79]. В [26, 90] для устранения влияния перспективных искажений измерения распределения облаков или просветов между ними по размерам проводились с самолета. Полученные таким образом распределения аппроксимировались выражением (рис. 8) [26]

$$W(r, n) = \frac{\alpha_r(n)}{\pi} \frac{\exp[-\alpha_r(n)r]}{\{1 - \exp[-2\alpha_r(n)r]\}^{3/2}} \quad (n = 0,1 - 0,9), \quad (13)$$

где n — средняя закрытость облаками зенита, определяемая как отношение суммарной площади облаков к площади наблюдаемой области зенита, $\alpha_r(n) = 0,27 \pm 0,8(n - 0,5)^2$, причем знак плюс соответствует $n - 0,5 < 0$, а минус — $n - 0,5 > 0$. Таким образом, наиболее часто встречаются небольшие облака (или просветы).

Среднеквадратичные значения флуктуаций яркости небосвода как в дневное, так и в ночное время для четырех окон прозрачности атмосферы представлены в табл. 4 [45]. Наименьшие флуктуации днем наблюдались в области спектра 4,6—4,9 мкм, а ночью в областях 2,0—3,0 и 3,1—4,0 мкм. К сожалению, в [45] представлены сильно усредненные данные без анализа влияния типа облачности на величину дисперсии, которая, согласно [26, 91], зависит не только от типа облачности, но и от угла возвышения.

Одномерные спектральные плотности мощности пространственных флуктуаций неба с частичной облачностью, представленные на рис. 9а, оказываются приблизительно обратно пропорциональными квадрату пространственной частоты во всех окнах прозрачности [45]. Этот вывод, полученный в результате усреднения большого числа данных, несколько отличается от выводов, приведенных в работах [25, 26, 53, 54, 92].

Амплитуда пространственных флуктуаций излучения наземных фонов зависит от спектральной области и может быть сравнима или даже больше величины флуктуаций небосвода с частичной облачностью. При наблюдении с поверхности Земли наименьшие флуктуации излучения леса и города днем наблюдаются в области 4,6—4,9 мкм, причем независимо от состояния облачности на небосводе, а ночью флуктуации минимальны в области 2,0—3,0 и 3,1—4,0 мкм (табл. 4) [45]. В области спектра 2,0—3,0 и 3,1—4,0 днем наблюдаются значительные вариации мощности флуктуаций с изменением состояния облачности на небосводе, а областях спектра 4,6—4,9 и 8—14 мкм они малы.

Одномерные плотности вероятности распределения амплитуды флуктуаций яркости в спектральной области 7,6—14 мкм подчиняются нормальному закону независимо от типа фона, а в спектральных областях, где вносит вклад рассеянный солнечный свет, для фона города — экспоненциальному закону или распределению (9), а для фона леса — распределению Гаусса [45]. Распределение пространственной протяженности шумовых импульсов фона леса и неба во всех спектральных

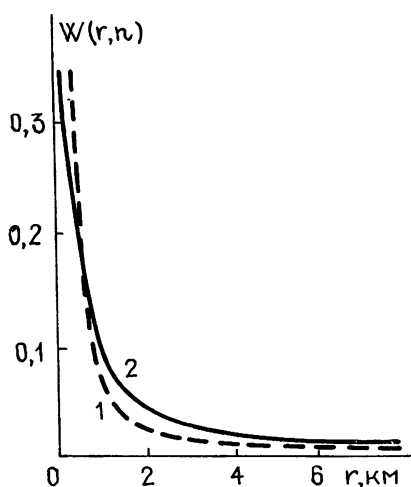


Рис. 8 Усредненные распределения облачных образований по размерам (1 — для $n=0,1$, 2 — для $n=0,9$).

областях и при любых погодных условиях аппроксимируется экспоненциальным законом (5) (рис. 7б, в) со значениями параметра α , приведенными в табл. 5 [45].

Усредненные одномерные спектральные плотности мощности флуктуаций яркости леса и города, представленные на рис. 9б, в, оказываются приблизительно обратно пропорциональными квадрату пространственной частоты, а коэффициенты взаимной корреляции, представленные в табл. 1, большими по величине, чем для ясного неба [45].

Таблица 5
Значения величин, обратных средней ширине фоновых импульсов

| Спектральная область, мкм | $\alpha, 1/\text{угл. град}$ | | | |
|---------------------------|------------------------------|---------------------|----------|------------|
| | Небосвод | | Фон леса | Фон города |
| | Частичная облачность | Сплошная облачность | | |
| 2,0—3,0 | 0,16 | — | 0,21 | 0,17 |
| 3,1—4,0 | 0,1 | — | 0,21 | 0,17 |
| 4,6—4,9 | 0,1 | 0,1 | 0,21 | 0,17 |
| 7,6—14,0 | 0,16 | 0,17 | 0,21 | 0,09 |

Характеристики средней спектральной яркости восходящего излучения облачности и ландшафтов, полученные в различных условиях при наблюдении с самолетов, хорошо освещены в многочисленных статьях и обобщены в монографиях [99—102]. Однако работ, посвященных исследованию статистических характеристик флуктуаций этого излучения, гораздо меньше [89, 103—108].

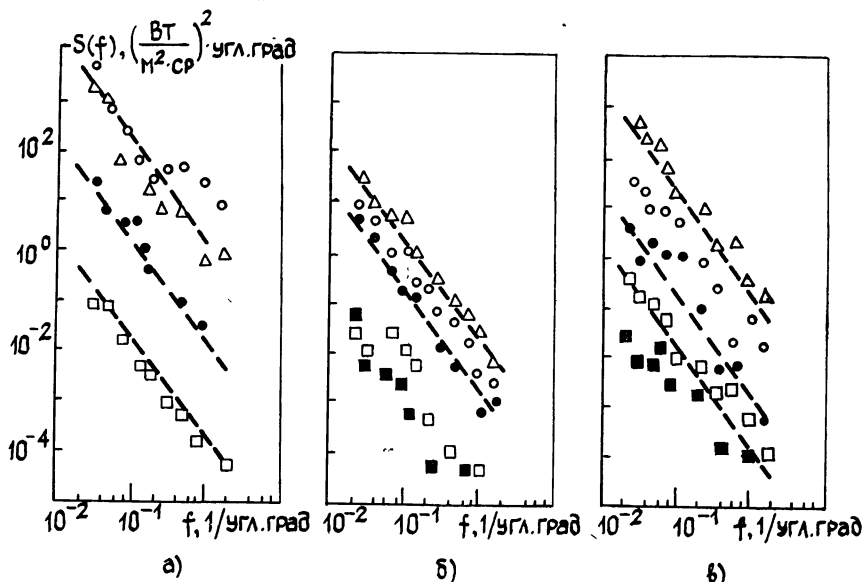


Рис. 9 Типичные одномерные спектральные плотности мощности а) фона неба с переменной облачностью, б) фона леса, в) фона города в спектральных областях: $\circ\circ\circ$ — 2,0—3,0 мкм; $\bullet\bullet\bullet$ — 3,1—4,0 мкм; $\square\square\square$ — 4,6—4,9 мкм, $\triangle\triangle\triangle$ — 7,6—14,0 мкм днем и $\blacksquare\blacksquare\blacksquare$ — 4,6—4,9 мкм ночью.

В видимой области спектра обширные исследования яркостных полей проводились при помощи аэрофотоснимков и телефотометров. Они показали, что естественные яркостные фоны анизотропны и неоднородны [14, 89,

^{105, 106}]. В диапазоне пространственных частот $0,02—2 \text{ м}^{-1}$ поля яркостей аэроландшафтов, рассматриваемые как совокупность одномерных реализаций, в общем случае могут быть представлены в виде нестационарной аддитивно-мультипликативной случайной функции, описываемой выражением (12) [14]. Были выделены три класса аэроландшафтов: 1) поселки, 2) лесные участки, 3) травяные участки и болота, различающиеся степенью изотропности и однородности [14]. Для яркостных полей первого класса характерно наличие мощных локальных неоднородностей, а для естественных ландшафтов неоднородность в основном обусловлена медленными изменениями среднего значения и дисперсии. Наиболее однородными являются мелкоструктурные ландшафты третьего класса, у которых распределение яркости близко к нормальному. Для первого и второго классов законы распределения несимметричны, и их относят к логарифмически нормальным [14].

После приведения полученных реализаций к стационарному виду путем вычитания из реализации $B(x)$ текущего среднего $m(x)$ и деления на текущее среднеквадратичное отклонение $\sigma(x)$ автокорреляционные функции хорошо аппроксимировались выражением

$$R(\xi) = ae^{-\alpha_1|\xi|} + be^{-\alpha_2|\xi|} \cos \beta\xi,$$

где первый член характеризует относительно быстрое затухание корреляционной функции на начальном участке, а второй член—слабо затухающую осциллирующую составляющую. Соответствующая спектральная плотность мощности имеет вид

$$S(\omega_x) = \frac{a\alpha_1}{\alpha_1^2 + \omega_x^2} + \frac{b\alpha_2(\alpha_2^2 + \beta^2 + \omega_x^2)}{[\alpha_2^2 + (\beta - \omega_x)^2][\alpha_2^2 + (\beta + \omega_x)^2]}.$$

На основе анализа спектров пространственных частот по таким характеристикам, как эффективная ширина спектра \bar{f}_Δ , максимальное значение $S(f_m)$ и частота главного максимума, ландшафты делят на пять основных групп (табл. 6).

Таблица 6

| Тип ландшафта | $\bar{f}_\Delta, \text{ м}^{-1}$ | $\bar{f}_m, \text{ м}^{-1}$ | $\overline{S(f_m)}, \text{ отн. ед.}$ | k_B |
|--|----------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-------|
| 1. Поселки | 0,08 | 0,02 | 1,6 | 0,51 |
| 2. Леса (старые, крупные) | 0,18 | 0,08 | 1,2 | 0,32 |
| 3. Сельскохозяйственные поля, луга смешанные | 0,14 | 0,08 | 1,15 | 0,15 |
| 4. Леса (молодые посадки) | 0,30 | 0,13 | 0,81 | 0,14 |
| 5. Густые луга, болота | 0,46 | 0,14 | 0,47 | 0,10 |

Примечание: Коэффициент вариации k_B — средний контраст между элементами яркостного поля

В видимой и инфракрасной областях спектра (0,5—1,1 и 0,3—11,5 мкм) исследования статистических характеристик интегрального излучения некоторых видов земного ландшафта и облачности производились двухканальным самолетным радиометром с высоты полета 2000—5000 м [108]. По известной методике [109] были рассчитаны математическое ожидание, дисперсия, плотность вероятности распределения яркости, корреляционная функция и среднеквадратичный контраст $k = \sigma_B/m_B$ (табл. 7). Зависимость контраста от освещенности не наблюдалась. Для спектральных областей 0,5—1,1 и 0,3—11,5 мкм средний коэффициент взаимной корреляции сопряженных реализаций составлял 0,7.

Таблица 7

Средние яркости и контрасты некогерентных видов фонов

| Объект | Спектральная область 0,5—1,1 мкм | | | Спектральная область 0,3—11,5 мкм | | |
|---------|----------------------------------|--|----------------|-----------------------------------|------------------------|----------------|
| | Высота Солнца, угл. град | $m_B, Вт/м^2 \cdot ср$ | k , отн. ед. | Высота Солнца, угл. град | $m_B, Вт/м^2 \cdot ср$ | k , отн. ед. |
| Облака | 17—25 | 30,7—50,1 | 0,50 | 17—25 | 44,3—69,4 | 0,23 |
| Равнина | 0—13 | 0,2—33,9 | 0,47 | 10—13 | 27,3—47,6 | 0,04 |
| Пустыня | 12—71 | 14,7—105 | 0,14 | 12—71 | 57,2—105 | 0,09 |
| Горы | 50—54 | 29,2—60,7 | 0,18 | 54 | 30,2 | 0,24 |
| Вода | 37—50 | $5,9 \cdot 10^{-3}$ — $1,46 \cdot 10^{-2}$ | 0,06 | 37—47 | 24,9—26,4 | 0,01 |

Аппроксимация гистограмм одномерной плотности вероятности проводилась путем минимизации функции

$$F_W(\sigma_1, \sigma_2, \delta_1^0, \delta_2^0) = \sum_{i=1}^{i_0} [W(\delta_i) - W_a(\delta_i)]^2,$$

где $\delta = (B - m_B) / \sigma_B$ — отклонение яркости в относительных единицах, $W(\delta_i)$ — гистограмма плотности вероятности, $W_a(\delta_i)$ — аппроксимирующая функция. Погрешность оценивалась величиной $\delta_{aW} = \sqrt{F_W/19}$. Полученные гистограммы с погрешностью, не превышающей 9%, аппроксимировались суммой двух нормальных распределений

$$W_a(\delta) = b_1 \exp \left[-\frac{(\delta - \delta_1^0)^2}{2\sigma_1^2} \right] + b_2 \exp \left[-\frac{(\delta - \delta_2^0)^2}{2\sigma_2^2} \right],$$

где b_1 и b_2 — коэффициенты, зависящие от вероятности присутствия первой и второй компонент. Однако иллюстрации экспериментальных гистограмм, представленные в [108], свидетельствуют о наличии многомодовости, которая обусловлена как многокомпонентностью земных ландшафтов, так и их неоднородностью по среднему значению.

Таким образом, в научно-технической литературе имеются неполные данные о статистических характеристиках пространственных флуктуаций излучения некоторых типов яркостных фонов: ясного и облачного небосвода, границы водной поверхности и небосвода, леса и города при наблюдении с поверхности Земли, а также облачности и разнообразных ландшафтов при наблюдении с самолета. Исследования показали, что естественные яркостные фоны неоднородны и нестационарны. Однако при расчетах статистических характеристик в основном были использованы методы, пригодные лишь при изучении стационарных случайных процессов. Поэтому в приведенных данных информация о статистических характеристиках мелкоструктурных флуктуаций, необходимая для расчетов оптико-электронных систем, замаскирована мощными крупномасштабными составляющими. Кроме того, до сих пор не установлена степень влияния ряда факторов (солнечного излучения, метеословий, прозрачности атмосферы, времени года, суток, места наблюдения и т. п.) на характер и пределы изменения статистических характеристик.

Все это не позволяет в полной мере оценить степень достоверности предлагаемых гипотетических моделей фонов и приводит к большим погрешностям при расчетах ОЭС, работающих в условиях изменяющихся различных фоновых помех.

Физическая природа естественных фонов очень сложна и многообразна. Описание различных фонов при помощи единой модели вряд ли возможно. Накопленные знания пока позволяют говорить лишь о типовых ансамблях фонов и в этом смысле надеяться на дальнейшую унификацию экспериментальных данных. На наш взгляд, для получения надежной и достаточно полной информации об отдельных ансамблях естественных фонов необходимо учесть хотя бы основные факторы, влияющие на характер и пределы изменения их статистических характеристик, и при расчетах пользоваться методикой прикладного анализа неоднородных и нестационарных случайных полей [14, 29, 30].

ЛИТЕРАТУРА

1. Смит Р, Джонс Ф, Чесмер Р. Обнаружение и измерение инфракрасного излучения — М: ИЛ, 1959
2. Круз П, Макгоулин Л, Макквистан Р. Основы инфракрасной техники. — М: Воениздат, 1964.

- 3 Джемисон Л. и др Физика и техника инфракрасного излучения — М. Сов. радио, 1965.
- 4 Марков М. Н. Приемники инфракрасного излучения. — М: Наука, 1968
- 5 Левшин В Л. Пространственная фильтрация в оптических системах пеленгации — М: Сов радио, 1971.
- 6 Хадсон Р Инфракрасные системы — М Мир, 1972.
- 7 Сеймуелсон Х — Зарубежная радиоэлектроника, 1971, № 11, с 17.
- 8 Левшин В. Л. Обработка информации в оптических системах пеленгации — М Машиностроение, 1978
- 9 Криксунов Л З, Найговзин О И, Мехряков В И Частотно-временные и пространственно-частотные характеристики модулирующих устройств — М· Машиностроение, 1972
- 10 Ефимов М В Следящие системы с оптическими связями. — М· Энергия, 1969
- 11 Порфирьев Л. Ф. Теория оптико-электронных приборов и систем — Л: Машиностроение, 1980
- 12 Якушенков Ю Г, Луканцев В Н, Колосов М П Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах — М· Радио и связь, 1981.
- 13 Лазарев Л П Инфракрасные и световые приборы самонаведения и наведения летательных аппаратов — М· Машиностроение, 1976.
- 14 Сергеев Д. А, Янутш Д А Статистические методы исследования природных объектов — Л· Гидрометеиздат, 1973
- 15 Robinson D Z — Proc IRE, 1959, 47, № 9, p 1554
- 16 Tiabka I B, Retling F I — J Opt Soc. Amer., 1964, 54, № 10, p. 1241.
- 17 Holter M R Fundamentals of Infrared Technology — N Y Mc Millan, 1962.
- 18 Kelton G and all — Infrared Phys, 1963, 3, p. 139.
- 19 Биберман Л И Растры в электрооптических устройствах — М Энергия, 1969
- 20 Кабанов М. В — В сб Всесоюзная конференция по распространению радио волн Ч 2—Казань, 1975, с 96
- 21 Montgomery W. D. — IEEE Trans Inf. Theory, 1964, IT-10, № 1, p 2.
- 22 Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники — М. Сов радио, 1978.
- 23 Сафронов Ю П, Эльман Р И Инфракрасные распознающие устройства — М· Воениздат, 1976
- 24 Steinberg R. — Appl Opt, 1980, 19, № 1, p. 77.
- 25 Зуев В Е, Кабанов М В Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех) — М Сов радио, 1977
- 26 Муллама Ю-А. Р и др Стохастическая структура толстой облачности и радиация — Тарту ИФА АН ЭССР, 1972.
- 27 Ванштейн Л А, Зубаков В Д Выделение сигналов на фоне случайных помех — М· Сов радио, 1960
- 28 Кузнецик О П, Захарич М Л Статья депонирована в ВИНТИ, рег № 2495-80. Деп. от 19 июня 1980 г
- 29 Рытов С М, Кравцов Ю А, Татарский В. И Введение в статистическую радиофизику Ч 2 Случайные поля — М· Наука, 1978
- 30 Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику Ч 1 Случайные процессы — М· Наука, 1976.
- 31 Казакевич Д И Основы теории случайных функций и ее применение в гидрометеорологии — Л· Гидрометеиздат, 1972
- 32 Цветков Э И Основы теории статистических измерений — Л· Энергия, 1979.
- 33 Резник М. Х. — Оптико-механическая промышленность, 1972, № 3, с 3
- 34 Бапкгалтер Р И, Инюхина И Г, Лунев В. С — Труды VI Всесоюзного симпозиума «Методы представления и аппаратурный анализ случайных процессов и полей» — Ереван, 1973, с 59
- 35 О'Нейл Э. Введение в статистическую оптику — М· Мир, 1976
- 36 Шкурский Б И — Техническая кибернетика, 1969, № 6, с 141
- 37 Абакшин Ю Е, Раковский Ю П — Труды Государственного оптического ин-та, 1979, 44, № 178, с 121
- 38 Arojan S F. — Proc. IRE, 1959, 47, № 3, p. 1561.
- 39 Elderling H G — J Opt Soc Amer, 1961, 51, № 12, p. 1424.
- 40 Деньщиков К К — Изв вузов — Приборостроение, 1969, № 10, с. 38
- 41 Евтихеев Н. Н, Пастушков А А — В сб· Проблемы голографии, 1974, вып 4, с 136
- 42 Казаков В А, Африканов С А — Оптико-механическая промышленность, 1977, № 9, с. 10.
- 43 Аверин Л Н — Труды Государственного оптического ин-та, 1979, 44, № 178, с. 136
- 44 Кендалл М, Моран П Геометрические вероятности — М: Наука, 1972
- 45 Itakura J, Tsutsumi S., Takagi T — Infrared Phys, 1974, 14, № 1, p 17.
- 46 Dunning S. I. — Appl. Opt., 1979, 18, № 10, p 1567.

- 47 Kulgein N. G Background Measurements Program Special Technical Report LMSC-D 502566, Lockheed Missile and Space Co., Palo Alto, Calif. (May, 1976).
- 48 Kulgein N. G Background Measurements Program. Second Special Technical Report LMSC-D 506988, Lockheed Missile and Space Co., Palo Alto, Calif. (September, 1976).
49. Раковский Ю. Н. — Труды Государственного оптического ин-та, 1979, 44, № 178, с. 129.
50. Филимонов Р. П., Коваленко Л. Г., Абакшин Ю. Е. — Оптико-механическая промышленность, 1975, № 6, с. 9.
- 51: Мухамедяров Р. Л., Комаров Г. А. — Радиотехника и электроника, 1973, 18, вып. 5, с. 1068.
- 52 Grove D. E. — Infrared Phys, 1980, 20, № 1, p. 29
- 53 Jones R. G. — J. Opt. Soc. Amer., 1955, 45, № 10, p. 799.
- 54 Fric Z. J — J. Opt. Soc. Amer., 1959, 49, № 10, p. 1007.
- 55 Першин А. А. Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере — Томск, 1975, с. 26
- 56 Першин А. А., Сакерин С. М. Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере — Томск, 1975, с. 28
57. Першин А. А. — В сб.: Вопросы дистанционного зондирования атмосферы — Томск, 1975, с. 171
58. Кабанов М. В., Першин А. А. Тезисы докладов V Всесоюзного симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере. — Томск, 1979, с. 230
- 59 Демидов Е. Ф. и др. — Изв. АН СССР — Физика атмосферы и океана, 1977, 13, № 1, с. 52.
- 60 Белоусов Ю. И., Демидов Е. Ф. — Изв. АН СССР — Физика атмосферы и океана, 1979, 15, № 2, с. 202.
61. Кабанов М. В., Першин А. А. — Изв. вузов — Физика, 1972, № 4, с. 74
- 62 Volle H. J. — Infrared Phys, 1965, 5, № 3, p. 115
- 63 Bell E. E. e. a. — J. Opt. Soc. Amer., 1960, 50, p. 1313.
- 64 Sloan R. e. a. — J. Opt. Soc. Amer., 1955, 45, p. 455.
65. Volle H. J. — Z. angew. Phys., 1960, 12, № 3, p. 125.
66. Shaw I. H. e. a — Mem. Soc. roy. sci. Liege, 1956, 18, p. 42.
67. Магсгау W. B. — J. Geophys. Res., 1961, 66, № 3, p. 987.
68. Кондратьев К. Я. и др. — Изв. АН СССР — Физика атмосферы и океана, 1965, 1, № 4, с. 363.
69. Попов О. И., Федорова Е. О. — Опт. и спектр, 1965, 18, № 3, с. 512.
70. Кузнечик О. П., Долинин В. В., Кобак И. А. — ДАН БССР, 1967, 9, № 11, с. 991.
71. Кузнечик О. П., Колесников В. М. — Вестник Белорусского ун-та, 1969, серия 1, № 2, с. 75.
72. Кузнечик О. П. — В сб.: Рассеяние света в земной атмосфере — Алма-Ата: Наука, 1972, с. 263.
- 73: Кузнечик О. П. — Тезисы V Всесоюзного симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. — Томск, 1978, Ч. 1, с. 163
- 74 Кузнечик О. П., Захарич М. П. Тезисы V Всесоюзного симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. — Томск, 1978, Ч. 1, с. 167.
- 75 Кузнечик О. П. — ДАН БССР, 1979, 23, № 3, с. 221.
76. Кузнечик О. П. — ДАН БССР, 1979, 23, № 8, с. 691
- 77 Кузнечик О. П. Тезисы докладов V Всесоюзного симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере — Томск, 1979, Ч. 1, с. 238
- 78 Кузнечик О. П. Тезисы докладов V Всесоюзного симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере — Томск, 1979, Ч. 1, с. 243
- 79 Кузнечик О. П. Тезисы докладов II Совещания по атмосферной оптике. — Томск, 1980, Ч. 1, с. 80.
80. Чеголин П. М., Афанасьев Г. К. Автоматизация анализа экспериментальных графиков. — М.: Энергоиздат, 1967
- 81 Худсон Д. Статистика для физиков — М.: Мир, 1967.
- 82 Itakura J, Tsutsumi S. — Денси цусин гаккай ромбунси, 1975, B58, № 1, p. 8
- 83 Малкевич М. С. Оптические исследования атмосферы со спутников — М.: АН СССР, 1973.
84. Городецкий А. К., Орлов А. П. — Изв. АН СССР — Физика атмосферы и океана, 1977, 13, № 4, с. 424.
- 85 Синькевич А. А., Руднева Л. Б. — Тезисы докладов V Всесоюзного симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере. — Томск, 1979, Ч. 1, с. 235.
- 86 Takagi T., Tsutsumi S. — Денси цусин гаккай ромбунси, 1968, 51-C, № 2, p. 51.
- 87 Itakura J., Tsutsumi S., Takagi T. — Сингакурон, 1972, 55-D, № 1, p. 8

88. Белич Р. Б., Горелик А. Г. и др. — Изв. АН СССР — Физика атмосферы и океана, 1976, 12, № 1, с. 29.
89. Яковлев А. А. — Изв. АН СССР — Физика атмосферы и океана, 1973, 9, № 3, с. 318.
90. Мулламаа Ю. Р., Пылдмаа В. К., Сульев М. А. — В сб.: Теплообмен в атмосфере. — М.: Наука, 1972.
91. Алленов М. И. Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере — Томск, 1975, с. 25
92. Алленов М. И., Чубаков Л. К. — В сб.: Радиационные процессы в атмосфере и на земной поверхности. Материалы IX Всесоюзного совещания по актинометрии. — Л.: Гидрометеоздат, 1974, с. 90
93. Алленов М. И., Бокий В. Д., Шуба Ю. А. — В сб.: Рассеяние света в земной атмосфере. — Алма-Ата: Наука, 1972, с. 184
94. Алленов М. И., Шуба Ю. А. — Изв. АН СССР — Физика атмосферы и океана, 1971, 7, № 9, с. 256.
95. Алленов М. И., Чубаков Л. Г., Шуба Ю. А. — В сб.: II Всесоюзный симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере. — Томск: ИОА АН СССР, 1973, с. 106.
96. Алленов М. И., Афонин А. В. — В сб.: Радиационные процессы в атмосфере и на земной поверхности Материалы IX Всесоюзного совещания по актинометрии — Л.: Гидрометеоздат, 1974, с. 94.
97. Алленов М. И. и др. — В сб.: Радиационные процессы в атмосфере и на земной поверхности Материалы IX Всесоюзного совещания по актинометрии — Л.: Гидрометеоздат, 1974, с. 86
98. Горсун Д. Л., Михайлова В. В., Чубаков Л. Г., Шуба Ю. А. Тезисы докладов II Всесоюзного симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере — Томск, 1973, с. 185
99. Гуди Р. М. Атмосферная радиация — М.: Мир, 1966
100. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности / Под ред. К. Я. Кондратьева — Л.: Гидрометеоздат, 1969.
101. Кондратьев К. Я., Авасте О. А. и др. Поле излучения Земли как планеты — Л.: Гидрометеоздат, 1967.
102. Андрианов Ю. Г., Караваев И. И., Сафронов Ю. П., Тулупов В. И. Инфракрасное излучение Земли в космос — М.: Сов. радио, 1973
103. Малкевич М. С. и др. — Изв. АН СССР — Геофизика, 1964, № 3, с. 394.
104. Малкевич М. С. и др. — Космические исследования, 1964, 2, № 2, с. 257
105. Истомина Л. Г. — Изв. АН СССР — Физика атмосферы и океана, 1966, 2, № 3, с. 263.
106. Истомина Л. Г., Козлов Е. М. — Изв. АН СССР — Физика атмосферы и океана, 1968, 4, № 7, с. 717
107. Истомина Л. Г. — Изв. АН СССР — Физика атмосферы и океана, 1963, 9, № 7, с. 708.
108. Гущин А. Н., Слуцкая С. Г., Шкурский Б. И. — Оптико-механическая промышленность, 1977, № 6, с. 10.
109. Румшинский Л. Ч. Математическая обработка результатов эксперимента. — М.: Наука, 1971.

Белорусский государственный
университет

Поступила в редакцию
26 декабря 1983 г.