

УДК 621.384

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ
ЕСТЕСТВЕННЫХ ФОНОВЫХ ПОМЕХ***В. А. Фираго, Б. Ю. Ханох*

Приводятся результаты экспериментальных исследований основных статистических характеристик пространственных флуктуаций дневного излучения фонов города, лиственного леса и дневного небосвода в окнах прозрачности атмосферы 2,1—2,4, 3,1—4,2, 4,5—5,1 мкм. Для различных состояний облачности на небосводе установлены ориентировочные пределы вариаций статистических характеристик исследуемых фонов и предлагаются аппроксимации одномерных и двумерных спектральных плотностей мощности и корреляционных функций, а также плотностей вероятности амплитудного распределения (полученных при помощи цифровой фильтрации для мелкоструктурных компонент фонов).

При проектировании оптико-электронных систем, работающих в условиях интенсивного мешающего яркостного фона, необходимо располагать данными о пространственных и временных флуктуациях фонового излучения, попадающего на приемник вместе с излучением, идущим от объекта [1,2].

Естественные яркостные поля (фоны) многообразны (небосвод, ландшафт, города, поселки, моря и т. п.); физическая природа их оптического излучения довольно сложна, поэтому в литературе обсуждаются лишь частные модели (в основном статистические и гипотетические) некоторых типовых ансамблей фонов, которые до сих пор для оценки степени достоверности нуждаются в экспериментальных данных о статистических характеристиках моделируемых фонов. Ограниченность экспериментальных данных обусловлена большими трудностями методического и экспериментального характера, подробно обсуждаемыми в [3]. По этой причине в настоящее время известны лишь некоторые неполные статистические характеристики фонового излучения [3-9], которые были получены исходя из предположения стационарности (однородности) фонов, на основе методик, обычно применяемых при статистическом прикладном анализе стационарных случайных процессов. В действительности же излучение большинства естественных яркостных полей неоднородно в пространстве и нестационарно во времени, так что погрешности определения статистических характеристик фонов, обусловленные пренебрежением этими факторами, могут быть значительными. Поэтому в большинстве работ, посвященных исследованию фонов, приводятся данные, усредненные по большому числу реализаций, полученных за довольно длительный интервал времени (годы). При столь большом интервале усреднения затруднительно соблюсти идентичность условий наблюдения, которые изменяются в очень широких пределах как детерминированно, так и случайным образом. Вследствие этого действительные статистические характеристики пространственных флуктуаций излучения частично нивелируются и возможности использования усредненных данных для описания реальной ситуации ограничены, тем более, что в упомянутых работах не приводятся ни характер, ни пределы возможных вариаций статистических характеристик.

В данной работе представлены более полные статистические характеристики пространственных флуктуаций излучения некоторых естественных яркостных полей (город, лес, небосвод), полученные

при различных условиях наблюдения, и приведены пределы наблюдаемых вариаций этих характеристик. Для более корректного определения статистических характеристик флуктуаций излучения мелкоструктурных компонент фона применялась методика расчета, позволяющая уменьшить погрешности, обусловленные влиянием пространственной неоднородности полей.

Измерения пространственного распределения интегральной энергетической яркости небосвода и ландшафта (лес, город) в окнах прозрачности атмосферы 2,1—2,4, 3,1—4,2, 4,5—5,1 мкм проводились днем в весенний, летний и осенний периоды при трех различных состояниях небосвода (ясное небо, переменная облачность, сплошная облачность) путем сканирования двухканальным инфракрасным радиометром по азимуту (в пределах $-90^\circ \div +90^\circ$ от противосолнечного вертикала) при фиксированных углах возвышения (в диапазоне $-2^\circ \div +25^\circ$). Расстояние от точки наблюдения до городских зданий составляло ~ 2 км, а до лиственного леса — ~ 300 м. Таким образом были исследованы 27 различных ситуаций, на каждую из которых приходилось примерно 5—8 реализаций. Реализации, записанные в цифровом коде на перфоленту, имели фиксированную длину (2048 выборок при шаге 5,4 угл. мин) и использовались в дальнейшем для расчетов основных статистических характеристик излучения фонов при помощи ЭВМ [10].

Яркостный фон в каждом окне i прозрачности атмосферы в первом приближении рассматривался как локальное изотропное случайное поле $B_i(x, y, t)$. Для описания его использовались следующие пространственные статистические характеристики: математическое ожидание m_i , дисперсия σ_{iB}^2 , одномерная плотность вероятности $W_i(B_i)$, автокорреляционная функция $R_i(\xi)$, одномерная спектральная плотность мощности $S_{ix}(\omega_x)$, двумерная спектральная плотность мощности $S_i(\omega)$, которая определялась через одномерную $S_{ix}(\omega_x)$ при помощи преобразования

$$S_i(\omega) = -2 \int_0^\infty \frac{d}{d\omega_x} [S_{ix}(\omega_x)] \frac{d\omega_x}{\sqrt{\omega_x^2 - \omega^2}}, \quad \omega^2 = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}, \quad (1)$$

вытекающего из условия изотропности фона. Для выявления статистических связей пространственных флуктуаций излучения в различных окнах прозрачности рассчитывались взаимные статистические характеристики: двумерная плотность вероятности $W_{ih}(B_i, B_h, \xi)$, условное математическое ожидание (функция регрессии) $\Phi_h(B_i)$, взаимно корреляционная функция $R_{ih}(\xi)$ и корреляционное отношение $P_{ih}(0)$.

Качественный анализ характера излучения исследуемых естественных фоновых помех показал, что помехи от излучения лиственного леса можно отнести к флуктуационному типу, а в излучении города и небосвода можно выделить компоненты как импульсного, так и флуктуационного характера, вклад которых зависит от условий наблюдения (угла возвышения, состояния небосвода, высоты Солнца и т. п.). Интенсивность флуктуаций излучения наземных фонов зависит от условий освещенности их Солнцем; наименьшие значения она имеет при сплошной облачности, а наибольшие — при ясном небе. В излучении небосвода минимальная интенсивность флуктуаций наблюдается для ясного неба, а максимальная — для переменной облачности.

Полученные количественные данные показали, что среднее значение яркости излучения наземных фонов в спектральной области 3,1—4,2 и 4,5—5,1 мкм в основном обусловлено собственным (тепловым) излучением, зависящим от их температуры. Вклад рассеянного солнечного излучения по сравнению с собственным в среднем достигал $\sim 40\%$ в области 3,1—4,2 мкм и $\sim 15\%$ в области 4,5—5,1 мкм. В спектральной области 2,1—2,4 мкм средняя яркость города и леса изменялась на два порядка в зависимости от состояния небосвода, а среднеквадратичное отклонение — в 10—20 раз. Во всех окнах про-

зрачности атмосферы наибольшие значения средней яркости m и среднеквадратичного отклонения σ_B излучения небосвода наблюдались при переменной облачности. При этом в области спектра 2,1—2,4 мкм среднеквадратичное отклонение флуктуаций небосвода с переменной облачностью было примерно в пять раз большим, чем в более длинноволновых окнах прозрачности атмосферы.

С целью уменьшения влияния неоднородности фонов радиусы корреляции пространственных флуктуаций яркости $\rho_k = \frac{1}{\sigma^2} \int_0^{\infty} |R(\xi)| d\xi$

рассчитывались через структурную функцию [10]. Для излучения леса и города они варьировали в пределах 0,2—1,6 угл. град, причем выявить их зависимость от состояния небосвода не удалось. Наименьшие радиусы корреляции флуктуаций яркости излучения небосвода 0,4—0,9 угл. град наблюдались при переменной облачности, а наибольшие 2,0—2,8 угл. град — при ясном небосводе, который обладает большой неоднородностью по среднему значению.

Наблюдавшиеся одномерные спектральные плотности мощности пространственных флуктуаций излучения фонов в исследуемом диапазоне пространственных частот ($|f| \leq f_{xв}$, где $f_{xв} = 0,5f_d = 5,35$ 1/угл.град) во многих случаях удается аппроксимировать выражением

$$S_x(\omega_x) = \alpha_B \sigma_B^2 / (\beta^2 + \omega_x^2)^n, \quad (2)$$

где α_B и β — коэффициенты аппроксимации, функционально связанные между собой. Для реализаций с наименьшими и наибольшими зарегистрированными значениями дисперсии в табл. 1 представлены параметры аппроксимации спектральных плотностей мощности исследованных фонов.

Наиболее сильные вариации параметров β , σ_B и n при изменении состояния небосвода наблюдались для фонов города и неба (табл. 1). Основным наиболее информативным параметром аппроксимации является показатель степени n , характеризующий скорость убывания спектральной плотности мощности с возрастанием частоты. Для города уменьшение n , а следовательно увеличение удельного веса высокочастотных составляющих спектральной плотности мощности наблюдалось при переходе от сплошной облачности к ясному небу, т. е. при возрастании освещенности города Солнцем. Причем, если в области 2,1—2,4 мкм зарегистрировано небольшое уменьшение n , то в областях 3,1—4,2 и 4,5—5,1 мкм оно было значительным, что, по-видимому, обусловлено возрастанием тепловых контрастов между освещенными Солнцем и неосвещенными (затененными) участками фона города. Для небосвода уменьшение значений n наблюдалось при переходе от ясного неба к переменной облачности во всех спектральных областях (см. табл. 1), а наибольшие изменения n были в областях спектра 2,1—2,4 и 3,1—4,2 мкм. При переменной облачности контрасты между глубым (холодным) небом и облаками значительны, что приводит к уменьшению скорости убывания спектральной плотности мощности, наиболее заметному в тех спектральных окнах, где вклад рассеянного солнечного излучения еще существует.

Для леса наблюдались гораздо меньшие вариации параметров спектральной плотности мощности при изменении состояния небосвода вследствие его более мелкой и однородной структуры.

Дисперсия флуктуаций излучения σ_B^2 была определена в полосе частот 0— $f_{xв}$, поэтому вид функциональной связи между α_B и β зависит не только от n , но и от полосы частот. Если экстраполировать (2) на всю область частот, то для $n > 0,5$ дисперсия окажется равной

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\alpha_B \sigma_B^2}{(\beta^2 + \omega_x^2)^n} d\omega_x = \frac{\alpha_B \sigma_B^2}{2\sqrt{\pi} \beta^{2n-1}} \frac{\Gamma(n-0,5)}{\Gamma(n)}, \quad (3)$$

Таблица 1

Спектральная область, мкм		2,1—2,4		3,1—4,2		4,5—5,1	
Состояние небосвода		сплошная облачность	ясное небо	сплошная облачность	ясное небо	сплошная облачность	ясное небо
Город	$\sigma_{B_1}^2 \left(\frac{BT}{M^2 \cdot cp} \right)^2$	$4 \cdot 10^{-4}$	0,49	$2,2 \cdot 10^{-4}$	0,01	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$7,8 \cdot 10^{-3}$
	n	0,75	0,65	1,12	0,4	1,17	0,52
	$\beta, 1/\text{угл. град}$	0,36	0,3	0,41	0,09	0,49	0,28
	α_B	0,78	0,7	0,77	0,42	0,95	0,59
	μ	0,8	1,0	трехмодов.	0,6	0,7	0,5
Лиственный лес	$\sigma_{B_1}^2 \left(\frac{BT}{M^2 \cdot cp} \right)^2$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	0,04	$2 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$7,7 \cdot 10^{-4}$
	n	0,75	0,65	1,15	1,1	0,55	0,9
	$\beta, 1/\text{угл. град}$	0,14	0,1	0,54	0,97	0,17	0,5
	α_B	0,49	0,47	0,26	2,2	0,55	1,0
	μ	2,0	1,8	1,9	1,8	1,9	1,4
Небосвод	Состояние небосвода	ясное небо	переменная облачность	ясное небо	переменная облачность	ясное небо	переменная облачность
	$\sigma_{B_1}^2 \left(\frac{BT}{M^2 \cdot cp} \right)^2$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	0,11	$8,1 \cdot 10^{-5}$	$7,6 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$
	n	1,7	0,45	1,9	0,75	1,1	0,7
	$\beta, 1/\text{угл. град}$	0,36	0,085	0,36	1,18	0,16	0,76
	α_B	0,31	0,45	0,23	1,53	0,17	1,08
	μ	1,0	0,5	1,0	0,45	1,0	0,45

где $\Gamma(n) = \int_0^{\infty} t^{n-1} e^{-t} dt$ — гамма-функция [11, 12]. Подставляя в (2) вместо $\alpha_B \sigma_B^2$ величину $\alpha \sigma^2$, имеем

$$S_x(\omega_x) = \alpha \sigma^2 / (\beta^2 + \omega_x^2)^n, \quad n > 0,5, \quad (4)$$

где α однозначно зависит от β и n ,

$$\alpha = \alpha_B \sigma_B^2 / \sigma^2 = 2\sqrt{\pi} \beta^{2n-1} \Gamma(n) / \Gamma(n-0,5), \quad n > 0,5. \quad (5)$$

Применяя теперь преобразование Фурье к (4) и воспользовавшись табличным интегралом (2.5.6.4) из [11], можно получить выражение для автокорреляционной функции в виде

$$R(\xi) = \frac{2\sigma^2}{\Gamma(n-0,5)} \left(\frac{\beta |\xi|}{2} \right)^{n-0,5} K_{n-0,5}(\beta |\xi|), \quad n > 0,5, \quad (6)$$

где $K_\nu(z) = \frac{\pi}{2} \frac{I_{-\nu}(z) - I_\nu(z)}{\sin \nu\pi}$ — модифицированная функция Бесселя

3-го рода, $I_\nu(z) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(z/2)^{\nu+2m}}{m! \Gamma(\nu+m+1)}$ — модифицированная функция

Бесселя 1-го рода. В частных случаях, когда $n=1$ и $n=3/2$, корреляционную функцию можно выразить следующим образом:

$$R(\xi) |_{n=1} = \sigma^2 e^{-\beta|\xi|}, \quad R(\xi) |_{n=3/2} = \sigma^2 \beta |\xi| K_1(\beta |\xi|).$$

При $n \leq 0,5$ интеграл (3) расходится, т. е. экстраполяция выражения (2) на всю ось частот неправомерна. В этом случае спектральная плотность мощности $S_x(\omega_x)$ на высоких пространственных частотах должна спадать быстрее, чем $1/\omega_x$, поскольку дисперсия флуктуаций яркости ограничена. Для выяснения поведения $S_x(\omega_x)$ на частотах, больших $f_{xв}$, как при $n < 0,5$, так и при $n \approx 0,5$, необходимы измерения с более высоким пространственным разрешением.

Пользуясь условием квазиизотропности, путем подстановки (2) в (1) и приближенного вычисления интеграла (1) была найдена двумерная спектральная плотность мощности в следующем виде:

$$S(\omega_x, \omega_y) = \gamma_n \sigma^2 / (\beta^2 + \omega_x^2 + \omega_y^2)^{n+0,5}, \quad n > 0,5, \quad (7)$$

где $\gamma_n = 4\pi \beta^{2n-1} (n-0,5)$. Нетрудно убедиться, что после интегрирования (7) по ω_y получается (4).

Необходимо иметь в виду, что если расстояния между наблюдателем и фоном иные, чем в наших измерениях, то при использовании соотношений (2), (7) следует учитывать масштабное преобразование спектров $S_{x_l}(\omega_x) = k_M S_x(k_M \omega_x)$, $S_{l}(\omega_x, \omega_y) = k_M^2 S(k_M \omega_x, k_M \omega_y)$, где $k_M = l_0/l$, $l_0 \approx 2$ км для города и $l_0 \approx 300$ м для леса.

Анализ взаимных статистических характеристик пространственных флуктуаций яркости излучения небосвода в различных окнах прозрачности показал, что корреляционное отношение $P_{ih}(0)$ равно или больше коэффициента взаимной корреляции $r_{ih}(0)$. Это указывает на существование нелинейной стохастической связи, причем наибольшие отклонения от линейности наблюдались в излучении сплошной неоднородной облачности. Для излучения этой облачности функция регрессии в спектральных областях 4,5—5,1 и 2,1—2,4 мкм в основном имела вид кривой, обращенной своей выпуклостью вниз, а в областях 3,1—4,2 и 2,1—2,4 мкм выпуклость могла быть обращена и вверх и вниз. Коэффициент взаимной корреляции излучения сплошной неоднородной облачности зависел от рассматриваемых спектральных диапазонов и для наиболее удаленных окон 2,1—2,4 и 4,5—5,1 мкм был отрицателен. Отрицательную корреляцию (антикорреляцию) можно

объяснить различным физическим механизмом излучения и характером сплошной облачности (участки облачности, например тонкие просвечивающиеся облака, создающие интенсивное рассеянное излучение, обладают слабым собственным излучением и наоборот). Наибольшая взаимная корреляция излучения ($r_{ik}(0)=0,7$) сплошной неоднородной облачности наблюдалась в окнах 3,1—4,2 и 4,5—5,1 мкм, что обусловлено сближением механизмов излучения. Для изучения ясного неба по сравнению со сплошной облачностью стохастическая связь была ближе к линейной. Однако влияние параметров атмосферы (главным образом концентрации и вида аэрозолей) здесь проявляется сильнее, что отражают коэффициенты взаимной корреляции, изменяющиеся в более широких пределах. Наибольшая положительная корреляция излучения ясного небосвода ($r_{ik}(0)=0,81$) была зарегистрирована в окнах 2,1—2,4 и 3,1—4,2 мкм, а наибольшая антикорреляция ($r_{ik}(0)=-0,78$) — в окнах 2,1—2,4 и 4,5—5,1 мкм. Причем, антикорреляция наблюдалась для излучения дымки над городом при углах возвышения 5—8°; ее также можно объяснить различными механизмами излучения в этих окнах. Наибольшие положительные коэффициенты взаимной корреляции ($r_{ik}(0)=0,77-0,92$) зарегистрированы при переменной облачности, что объясняется наличием сильного контраста между облаками и ясным холодным небом. Однако при сканировании под небольшими углами возвышения по почти сплошной кучевой облачности может наблюдаться и антикорреляция.

Стохастические связи, наиболее близкие к линейным, наблюдались в излучении наземных фонов. Корреляционное отношение для них незначительно превышало коэффициент взаимной корреляции, а в некоторых случаях эти величины совпадали. При ясном небосводе наибольшая взаимная корреляция ($r_{ik}(0) \approx 0,9$) излучения леса была в окнах прозрачности 3,1—4,2 и 4,5—5,1 мкм, а города — в окнах 2,1—2,4 и 3,1—4,2 мкм. При сплошной облачности как для леса, так и для города коэффициенты взаимной корреляции были минимальны ($r_{ik}(0) \approx 0,1$) в наиболее удаленных окнах 2,1—2,4 и 4,5—5,1 мкм, а при сближении спектральных участков увеличивались.

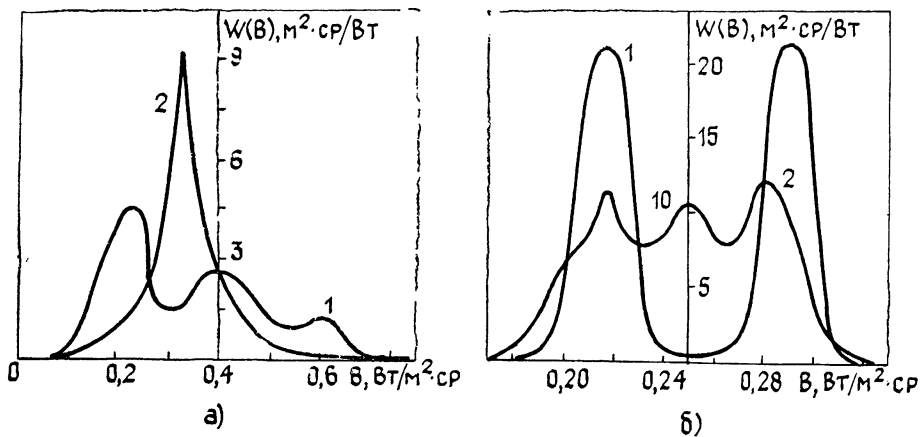


Рис. 1.

Наиболее сильно влияние пространственной неоднородности фонов сказывается при определении плотности вероятности амплитудного распределения яркости. Одномерные $W_i(B_i)$ и двумерные взаимные $W_{ik}(B_i, B_k, \xi)$ плотности вероятности, полученные без фильтрации, имели сложный вид, практически не поддающийся аппроксимации. Для подавляющего большинства реализаций они состояли из нескольких перекрывающихся мод, наличие которых вызвано, главным образом, низкочастотными вариациями средней яркости. Для устранения этого эффекта при исследованиях мелкоструктурных флуктуаций яркости нами была применена цифровая фильтрация низкочастотной составляющей. Фильтр с переходной полосой $(0,003 \div 0,05) f_d$, где $f_d = 10,7$ угл.

град^{-1} — частота дискретизации сигнала, подавляя низкочастотные составляющие спектральной плотности мощности на 62 дБ.

Одномерная плотность вероятности амплитудного распределения пространственных флуктуаций яркости, имеющая многомодовую структуру (рис. 1а, кривая 1), после фильтрации становится в большинстве случаев одномодовой (рис. 1а, кривая 2), а при ярко выраженной двухмодовой структуре (например излучение редких облаков на фоне голубого неба или излучение городских зданий в спектральной области 3,1—4,2 мкм при небосводе со сплошной облачностью (рис. 1б, кривая 1)) — становится трехмодовой (рис. 1б, кривая 2). Чисто одномодовые плотности вероятности хорошо аппроксимируются функцией

$$W(B) = \frac{A(\mu)}{\sigma_\Phi} \exp \left\{ - \left[\frac{|B|}{D(\mu) \sigma_\Phi} \right]^\mu \right\} \quad (8)$$

при оценке по критерию χ^2 ($\rho=0,05$), где $\sigma_\Phi^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega_x) |K_\Phi(\omega_x)|^2 d\omega_x$ —

дисперсия после фильтрации, $K_\Phi(\omega_x)$ — передаточная функция фильтра,

$$A(\mu) = \frac{\mu}{2} \sqrt{\frac{\Gamma(3/\mu)}{\Gamma^3(1/\mu)}}, \quad D(\mu) = \sqrt{\frac{\Gamma(1/\mu)}{\Gamma(3/\mu)}}, \quad \text{а } \mu \text{ изменяется для города}$$

от 0,4 до 1,1, для лиственного леса — от 0,9 до 2,0 и для небосвода — от 0,3 до 1,2. Величина μ зависит не только от типа яркостного поля, но и от степени его неоднородности по дисперсии (более неоднородные поля при прочих равных условиях имеют плотности вероятности с меньшим значением μ). Вариации значения показателя степени μ после линейной фильтрации случайных процессов с $W(B)$ вида (8) при помощи высокочастотных фильтров с различной частотой нижнего среза ($f_{\text{ср}} = (0,05 \div 0,45) f_{\text{д}}$), как показало моделирование на ЭВМ, не превышают 0,15.

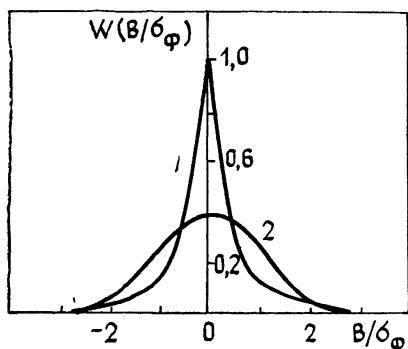


Рис. 2.

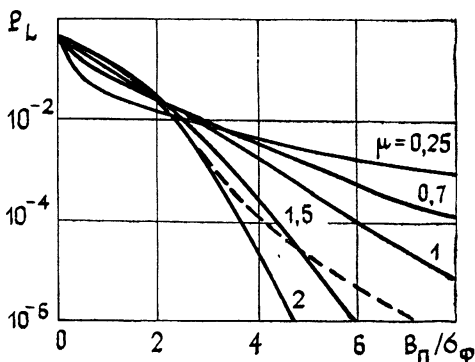


Рис. 3.

Для полей, плотности вероятности которых аппроксимируются функцией (8) с небольшими значениями μ , характерны колебания яркости, происходящие, в основном, возле среднего значения с редкими большими выбросами (рис. 2, кривая 1 ($\mu=0,75$)), а для полей с большими μ характер флуктуаций более равномерен (рис. 2, кривая 2 ($\mu=2$)). Поэтому вероятность P_L появления больших выбросов при малых значениях μ может быть на несколько порядков больше, чем для $\mu=2$ (рис. 3, где $B_{\text{п}}/\sigma_\Phi$ — относительный порог). Анализ результатов, полученных с более высоким пространственным разрешением, приводит к аналогичным выводам. Например, в [13] исследовались вероятности $P_L(B_{\text{п}}/\sigma_\Phi)$ появления выбросов после оптимального фильтра для реализаций, записанных с высоким пространственным разрешением ($\sim 0,5$ угл. мин). Фильтр был оптимизирован для приема сигнала от точечного излучателя на фоне шумов со спектраль-

ной плотностью мощности, пропорциональной $1/\omega_x^2$, и хорошо подавлял фоновые помехи. Поэтому после фильтрации мощность мелкоструктурных флуктуаций излучения фона была меньше мощности собственного шума регистрирующей системы. Экспериментальную зависимость P_L от относительного порога для кучевых облаков, полученную в [13], можно хорошо аппроксимировать функцией, показывающей вероятность появления выбросов суммы двух процессов: фонового шума с плотностью вероятности (8) при $\mu=0,5$ и собственного гауссова шума системы с дисперсией, в девять раз большей (см. рис. 3, штриховая линия). Таким образом, даже при оптимизации приемной системы по максимуму отношения сигнала к шуму естественные яркостные поля по сравнению с гауссовыми ($\mu=2$) создают гораздо большие помехи оптико-электронным системам, регистрирующим оптическое излучение «точечных» источников.

Для реализаций с одномодовой плотностью вероятности вида (8) двумерную плотность вероятности амплитудного распределения флуктуаций излучения фона в одном окне прозрачности можно приближенно аппроксимировать выражением

$$W(B_1, B_2, \xi) = \frac{A^2(\mu)}{\sigma_\Phi^2 \sqrt{1 - r_\Phi^2(\xi)}} \times \exp \left\{ - \frac{(|B_1|)^\mu - [|B_2 - B_1 r_\Phi(\xi)| / \sqrt{1 - r_\Phi^2(\xi)}]^\mu}{[D(\mu) \sigma_\Phi]^\mu} \right\}, \quad (9)$$

где $r_\Phi(\xi)$ — коэффициент автокорреляции после фильтрации,

$$r_\Phi(\xi) = \frac{1}{2\pi\sigma_\Phi^2} \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega_x) |K_\Phi(\omega_x)|^2 \cos(\omega_x \xi) d\omega_x.$$

Следовательно, двумерную плотность вероятности нетрудно найти, если известен коэффициент автокорреляции. В частном случае, когда $S_x(\omega_x) = 2\beta\sigma_x^2/(\beta^2 + \omega_x^2)$ и $|K_\Phi(\omega_x)|^2 = \omega_x^2/(\gamma^2 + \omega_x^2)$, коэффициент автокорреляции имеет следующий простой вид:

$$r_\Phi(\xi) = \frac{1}{\beta - \gamma} (\beta e^{-\beta|\xi|} - \gamma e^{-\gamma|\xi|}).$$

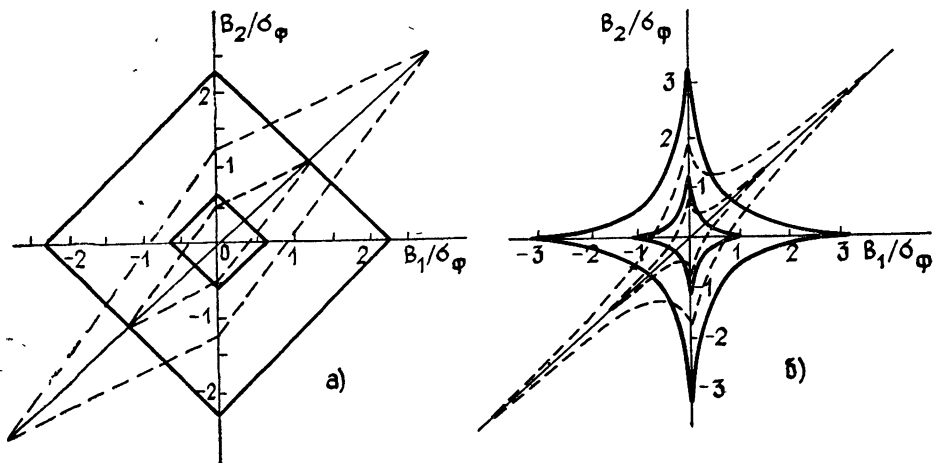


Рис. 4.

Для иллюстрации зависимости двумерной плотности вероятности от степени μ и коэффициента автокорреляции на рис. 4 представлены сечения (линии равной плотности вероятности) $W(B_1/\sigma_\Phi, B_2/\sigma_\Phi, r_\Phi)$

на уровне 0,2 (внутренние фигуры на рис. 4) и 0,02 (внешние) для $\mu=1,0$ (рис. 4а) и $\mu=0,5$ (рис. 4б) при коэффициенте автокорреляции, равном нулю (сплошные линии) и 0,9 (штриховые линии). Таким образом, при малых значениях μ двумерная плотность вероятности (9) очень сильно отличается от гауссовой, сечение которой на уровне 0,02 при $r_{\Phi}(\xi)=0$ представляет собой окружность с радиусом, равным 2,04.

После фильтрации корреляционное отношение $P_{ik}(0)$ и коэффициент взаимной корреляции $r_{\Phi ik}(0)$ флуктуаций яркости обычно были меньшими, чем до фильтрации, а стохастическая связь оказывалась ближе к линейной. Таким образом, крупномасштабные флуктуации сильно влияют на характер стохастических связей излучения естественных ярких полей в различных окнах прозрачности атмосферы.

В случае линейной стохастической связи после фильтрации одно-модовые двумерные взаимные плотности вероятности амплитудного распределения мелкоструктурных флуктуаций излучения ярких полей, рассматриваемые для двух окон прозрачности, можно приближенно аппроксимировать выражением

$$W_{ik}(B_i, B_k, \xi) = \frac{A(\mu_i) A(\mu_k)}{\sigma_{\Phi i} \sigma_{\Phi k} \sqrt{1 - r_{\Phi ik}^2(\xi)}} \times \exp \left\{ - \left[\frac{|B_i|}{D(\mu_i) \sigma_{\Phi i}} \right]^{\mu_i} - \left[\frac{|B_k - B_i (\sigma_{\Phi k} / \sigma_{\Phi i}) r_{\Phi ik}(\xi)|}{D(\mu_k) \sigma_{\Phi k} \sqrt{1 - r_{\Phi ik}^2(\xi)}} \right]^{\mu_k} \right\}.$$

Показатели степени μ_i и μ_k зачастую не равны между собой, поэтому $W_{ik}(B_i, B_k, \xi)$ может иметь разнообразную форму.

При оценке относительной суммарной погрешности δ_{Σ} определения статистических характеристик учитывались методические погрешности расчета δ_m и аппаратурные погрешности δ_a , причем в силу их независимости $\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_m^2 + \delta_a^2}$. Относительные среднеквадратические методические погрешности определения статистических характеристик оценивались для случайного изотропного поля, имеющего корреляционную функцию вида $R(\xi) = \sigma^2 e^{-\beta|\xi|}$ с радиусом корреляции $\rho_k = 0,5$ угл. град, при длине реализации $X = 180$ угл. град, и оказались равными: для дисперсии $\delta_{s_m} = 0,08$, корреляционной функции $\delta_{R_m} = 0,2$ (при $\xi = 0,5$ угл. град) и одномерной спектральной плотности мощности $\delta_{S_m} = 0,17$ (при точке среза корреляционной функции $\xi_m = 4$ угл. град). Величина аппаратурных погрешностей определения дисперсии, корреляционной функции и спектральной плотности мощности, как нетрудно показать, равна удвоенной погрешности определения крутизны преобразования радиометра $\delta_a = 2\delta_{S_B}$, где $S_B = \Delta u_c / \Delta B$. Относительная погрешность определения крутизны δ_{S_B} в свою очередь зависела от спектрального диапазона; для радиометра, применявшегося в исследованиях, она была равна 0,23, 0,12 и 0,13 в спектральных областях 2,1—2,4, 3,1—4,2, 4,5—5,1 мкм соответственно. Суммарные относительные погрешности определения дисперсии, корреляционной функции и одномерной спектральной плотности мощности для различных спектральных участков представлены в табл. 2.

Таблица 2

Спектральный диапазон, мкм	Суммарная относительная погрешность		
	$\delta_{\sigma^2 \Sigma}$	$\delta_{R \Sigma}$	$\delta_{S_x \Sigma}$
2,1—2,4	0,24	0,3	0,29
3,1—4,2	0,14	0,23	0,21
4,5—5,1	0,15	0,24	0,21

Изложенные выше результаты позволяют сделать следующие выводы. На основе экспериментальных исследований установлены ориентировочные пределы вариаций основных статистических характеристик пространственных флуктуаций дневного излучения рассматриваемых яркостных полей. Показано, что исследуемые яркостные фоны обладают пространственной неоднородностью, обусловленной главным образом изменением среднего значения. После применения цифровой фильтрации низкочастотных составляющих возможна достаточно простая аппроксимация основных статистических характеристик мелкоструктурных пространственных флуктуаций яркости, на основе которой следует развивать математические модели, описывающие статистические характеристики излучения яркостных полей, и оптимальные методы выделения сигналов из фоновых помех одноканальными и многоканальными оптико-электронными системами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левшин В. Л. Обработка информации в оптических системах пеленгации. — М.: Машиностроение, 1978.
2. Якушенков Ю. Г., Луканцев В. Н., Колосов М. П. Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах. — М.: Радио и связь, 1981.
3. Фираго В. А., Ханох Б. Ю., Долинин В. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 1984, 27, № 11, с. 1355
4. Itakura J. e. a. — *Infrared Phys.*, 1974, 14, № 1, p. 17.
5. Dunning S. I. — *Appl Opt.*, 1979, 18, № 10, p. 1567.
6. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). — М.: Сов. радио, 1977.
7. Кузнечик О. П., Захарич М. Л. Статья депонирована в ВИНТИ, рег. № 2495-80. Деп. от 19 июня 1980 г.
8. Першин А. А. — В сб.: Вопросы дистанционного зондирования атмосферы — Томск, 1975, с. 171.
9. Алленов М. И., Чубаков Л. К. Материалы IX Всесоюзного совещания по актинометрии — Л.: Гидрометеониздат, 1974, с. 90.
10. Фираго В. А., Ханох Б. Ю., Гилевский С. В. — В сб.: Методы и средства обработки оптической информации. (Материалы семинара). — М., 1983, с. 81.
11. Прудников А. П., Брычков Ю. А., Маричев О. И. Интегралы и ряды. Элементарные функции — М.: Наука, 1981.
12. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. — М.: Наука, 1978
13. Longmire M. S., Milton A. F., Takken E. H. — *Appl. Opt.*, 1982, 21, № 21, p. 3819

Белорусский государственный
университет

Поступила в редакцию
4 апреля 1985 г.

STATISTICAL CHARACTERISTICS OF SOME NATURAL BACKGROUND NOISE

V. A. Firago, B. U. Khanokh

The results of the experimental study of basic statistical characteristics of space fluctuations of the day radiation backgrounds of town, deciduous forest and day sky in the atmosphere transparency windows of 2,1 — 2,4, 3,1 — 4,2, 4,5 — 5,1 μm are given. The rough limits of statistical characteristics variation of studied backgrounds are determined for different states of sky cloudiness, and the approximations of the obtained one-dimensional and two-dimensional spectral power densities and correlations functions are suggested. The statistical characteristics of fine-structured components of backgrounds are analyzed using digital filtration, and the approximations of their one-dimensional and two-dimensional densities of the amplitude distribution probability are given.