

Статистические характеристики лазерной помехи и ее влияние на ИК оптико-электронные системы наблюдения

Н.И.Павлов, Ю.А.Резунков

Рассмотрены статистические характеристики лазерной помехи, регистрируемой в фокальной области ИК оптико-электронной системы наблюдения при ее полевой и внеполевой засветке лазерным излучением. Обоснована применимость аналитического описания экспериментальных гистограмм распределения сигнала лазерной помехи на выходе матричного фотоприемного устройства с привлечением аппроксимаций плотности вероятности распределения в виде гамма-распределения и функции Гаусса. Показано, что конкретный вид этих функций определяется как средним значением (математическим ожиданием) сигнала помехи, так и характеристическим параметром M , зависящим от статистических свойств лазерной помехи.

Ключевые слова: ИК оптико-электронная система, квазиточечный объект, лазерная помеха, плотность вероятности распределения, гамма-распределение, гауссова функция, вероятность ложной тревоги, вероятность пропуска цели.

1. Введение

Лазерное воздействие на оптико-электронные системы (ОЭС) наблюдения квазиточечных объектов (целей) представляет собой актуальную проблему, исследования которой уделяется значительное внимание специалистами [1–6]. Известно, что воздействие лазерного излучения наиболее эффективно, если оно попадает в спектральный диапазон работы ОЭС. В реальных условиях могут реализовываться два основных режима лазерного воздействия: полевое, когда лазерный излучатель находится в поле зрения оптической системы и его излучение сфокусировано на матрице фотоприемного устройства, и внеполевое, когда излучатель находится вне поля зрения оптической системы, а засветка фоточувствительной матрицы осуществляется излучением, рассеянным на оптических и конструктивных элементах приемного объектива.

Анализ экспериментальных исследований, проведенных в [2–6], показывает, что при полевом воздействии в фокальном матричном фотоприемном устройстве (МФПУ) возникает область «насыщенных» пикселей (область ядра лазерного пучка), за пределами которой интенсивность лазерного излучения достаточно быстро снижается по мере удаления от ядра. Такое изменение интенсивности излучения допускает ее оценку с использованием аналитической аппроксимации функции рассеяния точки приемного объектива. Следует отметить, что интенсивность насыщения фоточувствительных элементов МФПУ зависит от лазерного излучения, которое может быть как импульсным, так и непрерывным. Увеличение мощности излучения может привести к разрушению той части чув-

ствительных элементов фотоприемного устройства, которые находятся в области ядра лазерного пучка или прилегают к ней.

Описание результатов внеполевого лазерного воздействия на ОЭС, обусловленного засветкой матрицы фотоприемного устройства рассеянным излучением (далее называемой лазерной помехой), является более сложной задачей. Экспериментальные исследования, выполненные в [1], показывают, что распределение интенсивности рассеянного излучения в плоскости матричного фотоприемника имеет спеклованный характер. При этом регистрируемое МФПУ рассеянное излучение воспринимается как дополнительный шумовой сигнал, снижающий обнаружительные возможности ОЭС. Для ОЭС наблюдения квазиточечных объектов (ниже речь пойдет о системах ИК диапазона) в качестве обнаружительных характеристик обычно рассматриваются вероятности ложной тревоги и пропуска цели с использованием гауссовых аппроксимаций интенсивности реальных фоновых засветок. Из результатов работы [1] следует, что лазерная помеха не описывается гауссовой функцией плотности вероятности распределения. В связи с этим определение ее влияния на указанные обнаружительные характеристики ОЭС требует отдельного рассмотрения, которому и посвящена настоящая статья.

Проведенное в работе теоретическое исследование опирается как на экспериментальные данные, полученные ранее [1, 2], так и на ряд дополнительных экспериментов по облучению макета ОЭС излучением импульсных СО- и НФ-лазеров. Результатом теоретического анализа является аналитический метод оценки обнаружительных характеристик исследуемой (проектируемой) ОЭС, разработанный на основе исследований статистических характеристик лазерной помехи в условиях засветки МФПУ рассеянным лазерным излучением. Предложенный метод использует и гамма-распределение [7], и гауссово приближение [8] для описания плотности вероятности распределения сигнала помехи как функции среднего значения \bar{U} зарегистрированного напряжения лазерной по-

Н.И.Павлов, Ю.А.Резунков. АО «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения», Россия, Ленинградская обл., 188540 Сосновый бор, ул. Ленинградская, 29, литера Т; e-mail: yuri@sbior.net

мехи на выходе МФПУ и характеристического параметра M , зависящего от когерентных свойств рассеянного лазерного излучения, попадающего на фокальную матрицу. Реализация метода предполагает необходимость создания макета исследуемой ОЭС для проведения экспериментов с целью получения данных об указанных статистических характеристиках лазерной помехи.

Отметим, что в работах [1, 2] использовался макет ОЭС, оптическая система которой представляла собой объектив на основе внеосевого параболического зеркала с блендой, а фотоприемным устройством служила охлаждаемая матрица с чувствительными элементами из InSb размером 128×128 пикселей. Выполненный в настоящей статье теоретический анализ распространяется на случаи, когда лазерная помеха, обусловленная рассеянным лазерным излучением, регистрируется фокальной матрицей в линейном диапазоне ее чувствительности.

2. Особенности формирования лазерной помехи рассеянным излучением: анализ экспериментальных данных

Экспериментальные исследования [1, 2], проведенные с участием одного из авторов настоящей работы, показывают, что есть общие закономерности в формировании лазерной помехи как при полевом, так и при внеполевым воздействии на ОЭС, заключающиеся в образовании спеклованного светового поля в фокальной области оптической системы.

При полевым воздействием формируется сложная картина распределения интенсивности излучения, регистрируемой фокальным МФПУ (рис.1,а). Область керны лазерного пучка, т.е. область насыщенных пикселей, окружена областью функционально подавленных пикселей, где интенсивность излучения достаточно быстро снижается по мере удаления от керны. В облучение области поверхности МФПУ, находящейся за пределами керны, существенный вклад дает излучение, рассеянное на технологических неоднородностях в оптических элементах системы, которое при регистрации имеет вид спеклованного изображения [1–4].

Точная форма распределения сигнала МФПУ при полевым воздействием зависит от многих факторов, определяемых конкретной оптической системой ОЭС. Для его при-

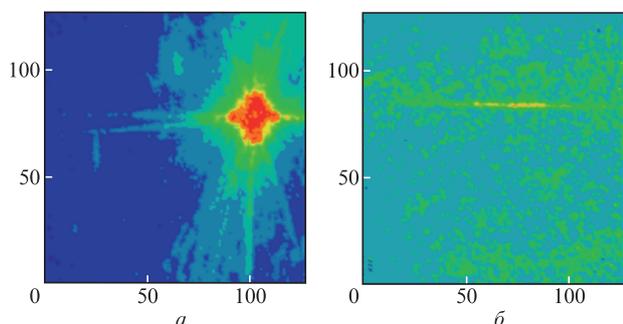


Рис.1. Примеры полевого (а) и внеполевого (б) влияния на изображения, регистрируемые МФПУ, с сигналом от имитатора цели в виде яркой горизонтальной полосы. Здесь и на рис.2, 4 цифры на осях – номера столбцов и строк приемной матрицы ОЭС. Цветные варианты рис.1 и 3 помещены на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

ближенной оценки используют различные аналитические аппроксимации функции рассеяния точки (PSF) приемного объектива. В частности, в [3] предложена аппроксимация PSF в виде ее зависимости от расстояния от центра керны лазерного пучка x :

$$PSF(x) \approx (1 - \rho) \frac{4}{\pi x^3 + 4} + \rho.$$

Здесь сделана попытка учесть влияние на PSF рассеяния излучения на оптических элементах через малый параметр ρ , характеризующий интенсивность рассеяния при облучении ОЭС лазерным излучением.

Интенсивность излучения при внеполевым воздействии в первую очередь зависит от угла засветки θ (угол между осью лазерного пучка и оптической осью приемного объектива) оптической системы ОЭС. Характерной особенностью лазерной помехи при этом является спеклованное распределение интенсивности светового поля, т.е. квазирегулярное распределение интенсивности с определенными пространственным масштабом и амплитудой. Пример такого спекл-сигнала представлен на рис.1,б, где приведено изображение лазерной помехи совместно с сигналом от имитатора цели в виде яркой горизонтальной полосы, зарегистрированное при внеполевой засветке макета ОЭС [1] излучением HF-лазера. При определенной интенсивности излучения лазерная помеха полностью подавляет сигнал от цели.

Как впервые показано в [1], распределение сигналов лазерной помехи по пикселям МФПУ зависит от спектрального состава и поляризации лазерного излучения. В свою очередь, спектральный состав излучения определяют такие его характеристики, как временная и пространственная когерентности. В условиях, когда с помощью МФПУ регистрируется неоднородное распределение излучения с интегрированием мгновенной интенсивности за конечное время, степень когерентности влияет на среднеквадратичное значение отношения регистрируемого сигнала к его шуму [7]. С физической точки зрения оно будет зависеть от соотношения между временем накопления сигнала в МФПУ и временем когерентности излучения, формирующего этот сигнал. В этом случае, предполагая, что за время накопления сигнала спеклованное лазерное излучение является эргодическим и статистически стационарным, воспользуемся гамма-распределением для описания гистограмм распределений сигналов в изображениях лазерной помехи, регистрируемых МФПУ. Характеристическим параметром, входящим в функцию, описывающую это распределение, является параметр M , зависящий как от спектральных характеристик лазерного излучения, так и от оптических параметров ОЭС.

Для спекл-структуры частично поляризованного излучения, образующейся в виде суммы двух независимых световых полей (полностью поляризованного и полностью деполаризованного рассеянного излучения), функция плотности вероятности распределения интенсивности излучения (PDF – probability density function) имеет вид [7]

$$PDF = \frac{\sqrt{\pi}}{\Gamma(M)} \left(\frac{Mu}{P\bar{U}} \right)^M \left[\frac{4PM}{(1 - P^2)u\bar{U}} \right]^{1/2} \times \exp \left[- \frac{2Mu}{(1 - P^2)\bar{U}} \right] I_{M-1/2} \left(\frac{2PM}{(1 - P^2)\bar{U}} \right), \quad (1)$$

где $J_{M-1/2}$ – модифицированная функция Бесселя 1-го рода порядка $M-1/2$; $\Gamma(M)$ – гамма-функция от параметра M ; P – степень поляризации излучения; u – текущее значение сигнала с пикселей матрицы (в вольтах).

В случае полностью развитых спеклов и полностью деполаризованного излучения функция PDF приобретает следующий вид [7]:

$$PDF(P = 0) = \left(\frac{2M}{\bar{U}}\right)^{2M} \frac{u^{2M-1}}{\Gamma(2M)} \exp\left(-2M\frac{u}{\bar{U}}\right). \quad (2)$$

Связь параметра M с определяемыми из эксперимента средним значением зарегистрированного напряжения сигнала помехи (математическим ожиданием \bar{U}) и соответствующим ему среднеквадратичным значением σ_{sn} с точностью до постоянного множителя $(1 + P^2)^{1/2}$ описывается соотношением [7]

$$\sigma_{sn} = \sqrt{1/(2M)} \bar{U}. \quad (3)$$

Известно (см., напр., [9]), что поляризация лазерного излучения после отражения от элементов конструкции и оптических элементов приемного объектива ОЭС зависит от материала, из которого сделаны эти элементы, и угла засветки θ . Многократные отражения лазерного из-

лучения приводят к практически полной его деполаризации. Как показано в [1], степень поляризации P лазерного излучения в фокальной области объектива макета ОЭС составила 0.58 при $\theta = 2^\circ$ и уменьшалась с увеличением θ из-за многократных отражений рассеянного излучения.

Определим конкретный вид функции PDF по экспериментальным кадрам регистрации лазерной помехи, полученным с использованием последовательности операций, описанной в [1], и соотношения (3). На рис.2 для примера приведены изображения сигнала лазерной помехи при полевом воздействии на макет ОЭС излучений импульсных СО- и HF-лазеров. Области, выделенные белым цветом, соответствуют насыщенным пикселям матрицы. На рис.3 представлены гистограммы распределений сигнала лазерной помехи, построенные по этим изображениям. При построении аппроксимаций экспериментальных гистограмм распределения сигнала лазерной помехи (синие кривые) и аналитических аппроксимаций этих гистограмм функцией PDF, имеющей вид (2) (красные кривые), белые области изображений не учитывались. Интеграл (площадь под кривой PDF) от плотности вероятности распределения сигнала равен единице. Параметр M в выражении (2) равен 3.0 при воздействии СО-лазера и 2.1 при воздействии HF-лазера. Эти значения достаточно близки.

Примеры экспериментальных изображений сигнала лазерной помехи при внеполевом воздействии ($\theta = 2^\circ$) на макет ОЭС излучения 2-й гармоники СО₂-лазера, взятые из [1], представлены на рис.4 для длин когерентности из-

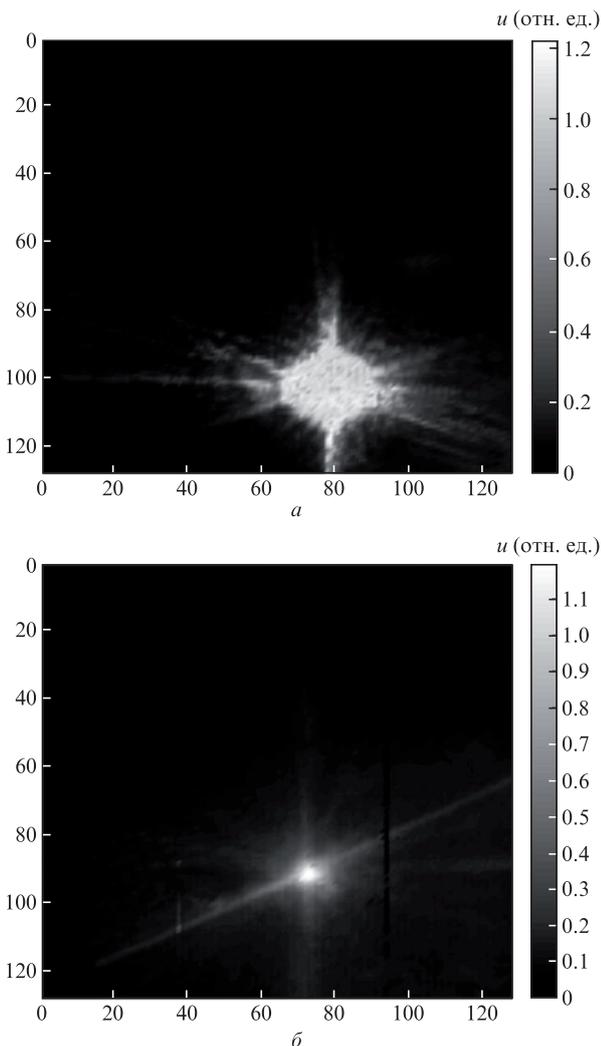


Рис.2. Изображения сигнала лазерной помехи при полевом воздействии на макет ОЭС излучений СО- (а) и HF-лазеров (б).

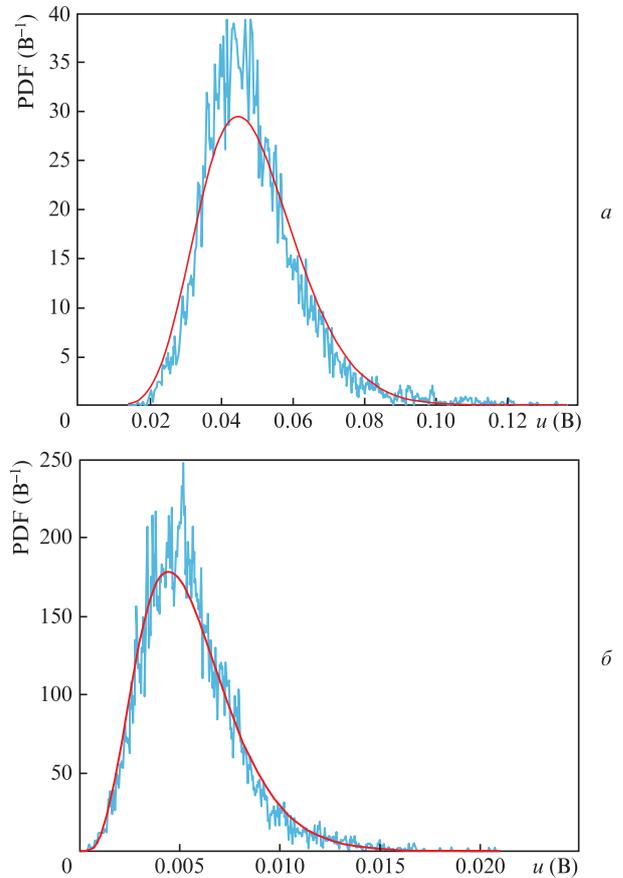


Рис.3. Гистограммы распределений сигнала лазерной помехи (синие кривые) и их аппроксимации функцией (2) (красные кривые) при воздействии на макет ОЭС излучений СО- (а) и HF-лазеров (б) для $M = 3.0$ (а) и 2.1 (б).

лучения $l_{\text{coh}} = 3$ и 0.003 м. Отвечающие рис.4 гистограммы распределения сигнала помехи (кружки, соответствующие вершинам прямоугольников) и их аппроксимации с использованием функции PDF (2) (сплошные кривые) и гауссовой функции (см. ниже (8)) (штриховые кривые) приведены на рис.5. Значения параметра M в данном случае уже существенно различаются: $M = 4.20$ при $l_{\text{coh}} = 3$ м и 9.61 при $l_{\text{coh}} = 0.003$ м.

Приведенные результаты показывают достаточно хорошее совпадение экспериментальных распределений сигнала лазерной помехи с их аппроксимацией функцией PDF (2) (далее будем ее называть гамма-распределением) при использовании соотношения (3) как при полевом, так и при внеполевом облучении макета ОЭС. Очевидно также, что параметр M зависит от спектральных характеристик лазерного излучения и от режима лазерного воздействия на ОЭС (полевого или внеполевого). Дополнительный анализ показал, что при полевом воздействии параметр M меняется от 1 до 3, а при внеполевом – от 3 до нескольких десятков в зависимости от угла засветки приемного объектива ОЭС, т.е. с увеличением угла засветки возрастает вклад многократных отражений излучения в сигнал лазерной помехи, которые снижают степень его когерентности.

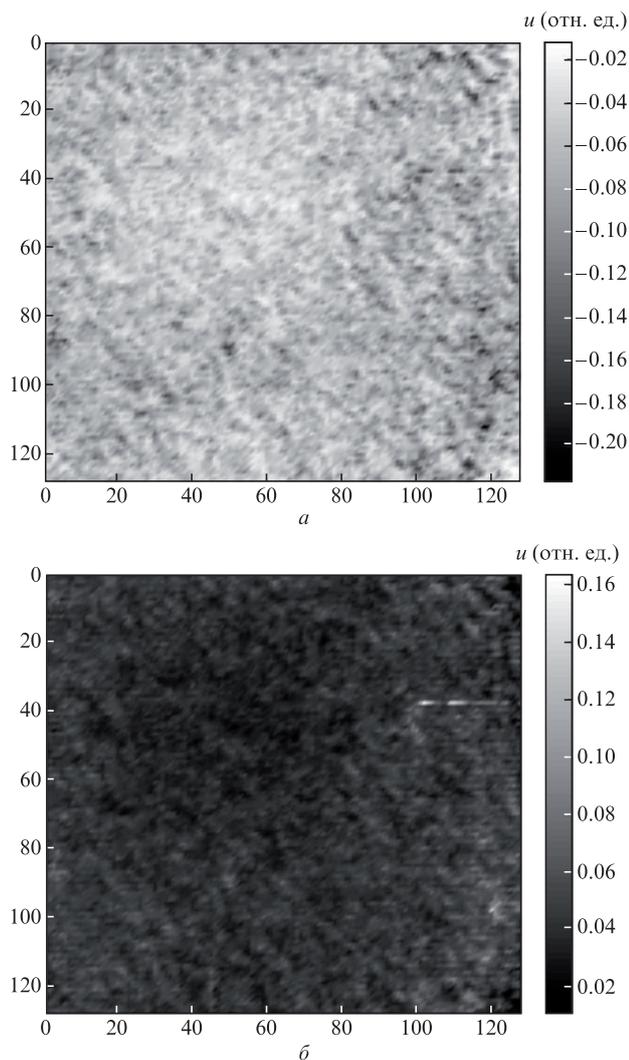


Рис.4. Изображения сигнала лазерной помехи при внеполевом воздействии ($\theta = 2^\circ$) на макет ОЭС излучения CO_2 -лазера для $l_{\text{coh}} = 3$ (а) и 0.003 м (б).

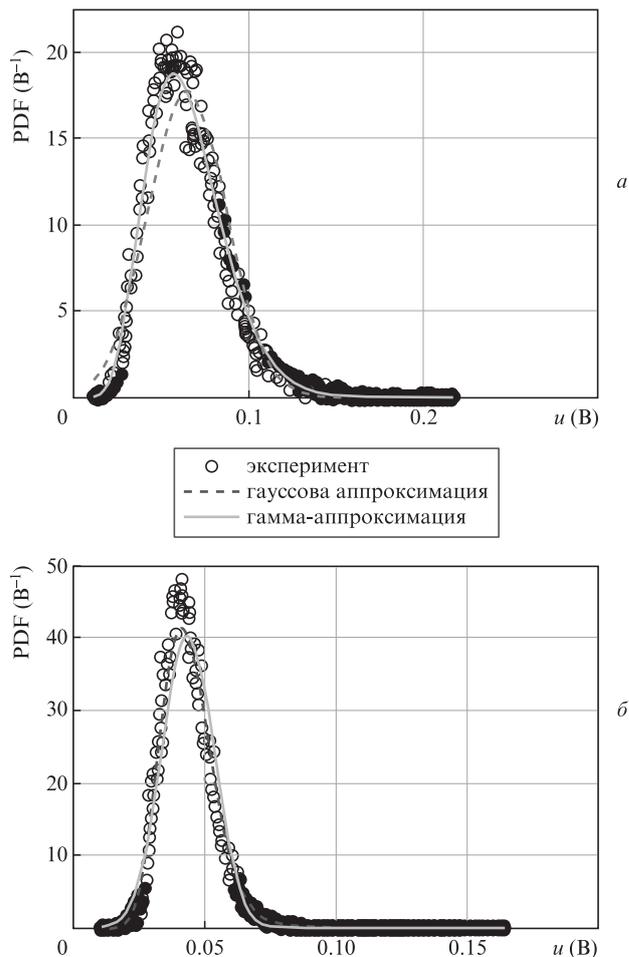


Рис.5. Гамма-аппроксимация и гауссова аппроксимация сигнала лазерной помехи для $l_{\text{coh}} = 3$ м, $M = 4.20$ (а) и $l_{\text{coh}} = 0.003$ м, $M = 9.61$ (б).

3. Влияние лазерной помехи на вероятности ложной тревоги и пропуска цели

Функциональные возможности ОЭС обнаружения наиболее часто устанавливают с помощью таких статистических характеристик, как вероятность ложной тревоги (реализация альтернативной гипотезы определяется вероятностью правильного необнаружения) и вероятность пропуска цели (реализация альтернативной гипотезы определяется вероятностью правильного обнаружения). Для нахождения порогового напряжения U_{th} срабатывания обнаружительного устройства используются разные критерии оптимального обнаружения. На практике предпочтение отдается критерию Неймана – Пирсона, поскольку он не требует знания априорных вероятностей и в случае гауссова распределения сигналов обеспечивает максимальную вероятность правильного обнаружения квазиточечного объекта при заданной вероятности ложной тревоги [8, 10]. Проведенный ниже анализ представляет собой аналитическое описание вероятностей ложной тревоги и пропуска цели при лазерном воздействии на ОЭС с обоснованием возможности привлечения аппроксимации сигнала лазерной помехи как гауссовой функцией, так и гамма-распределением.

Во всех рассмотренных случаях для исключения влияния естественного лабораторного фона и учета влияния только лазерной помехи на обнаружительные характеристики ОЭС предварительно созданное фоновое изображе-

ние вычиталось из рабочего изображения с лазерной помехой [1]. При этом остаточное (неустраняемое) среднеквадратичное значение напряжения собственного шума матрицы σ_n , не превышало 0.002 В при времени накопления сигнала 100 мкс. В отсутствие лазерной помехи отношение сигнал/шум $SNR = U_s/\sigma_n \geq 20$, что гарантировало близкие к единице значения вероятности обнаружения сигнала P_d при вероятности ложной тревоги $P_{fa} \leq 0.001$. Для обеспечения $P_{fa} = 0.001$ нами выбиралось $U_{th} = 0.012$ В. Далее в статье эти начальные значения используются при теоретическом исследовании влияния лазерной помехи на обнаружительные характеристики ОЭС.

Оценка вероятности ложной тревоги может быть получена с помощью следующего выражения [8]:

$$P_{fa} = \int_{U_{th}}^{\infty} PDF(u) du, \quad (4)$$

где PDF – функция плотности вероятности распределения сигнала помехи. В случае лазерной помехи выражение (4) для вероятности ложной тревоги с учетом (2) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} P_{fa} &= \int_{U_{th}}^{\infty} \frac{(2M)^{2M}}{\bar{U}^{2M}} \frac{u^{2M-1}}{\Gamma(2M)} \exp\left(-2M\frac{u}{\bar{U}}\right) du \\ &= \frac{(2M)^{2M}}{\Gamma(2M)} \int_{U_{th}/\bar{U}}^{\infty} z^{2M-1} \exp(-2Mz) dz, \end{aligned} \quad (5)$$

т.е. вероятность P_{fa} зависит как от среднего значения напряжения лазерной помехи \bar{U} , так и от когерентности сформированного светового спекл-поля, в общем виде определяемой характеристическим параметром M .

В качестве иллюстрации этой зависимости в табл.1 приведены оценки вероятности ложной тревоги, рассчитанные по формуле (5), при полевом воздействии на макет ОЭС импульсами двух типов лазеров, значения энергий которых различны. Параметр M определялся по экспериментально измеренным среднему (\bar{U}) и среднеквадратичному (σ_{sn}) значениям сигнала помехи в соответствии с выражением (3). Эти лазеры отличаются многоспектральностью генерируемого излучения (до 10 спектральных линий в импульсе) и, следовательно, малой степенью когерентности излучения.

Обращает на себя внимание тот факт, что вероятность ложной тревоги сильно возрастает с увеличением среднего и среднеквадратичного значений сигнала помехи. При этом для обоих типов лазеров параметр M изменяется незначительно, оставаясь в пределах от 1.90 до 2.95.

Для определения вероятности пропуска цели в условиях лазерной помехи необходимо знать плотность вероятности распределения суммарного сигнала от лазерной помехи и цели. Полагая две случайные величины (сигнал

от цели и сигнал лазерной помехи) независимыми друг от друга, воспользуемся следующим выражением для функции плотности вероятности распределения суммарного сигнала $f(z)$ [10]:

$$f(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{sn}(z-x)f_{ob}(x)dx, \quad (6)$$

где f_{sn} и f_{ob} – плотности вероятности распределений сигнала лазерной помехи и сигнала от цели соответственно. С учетом (6) для оценки вероятности пропуска цели P_m имеем выражение

$$P_m = \int_{-\infty}^{U_{th}} f(z) dz = \int_{-\infty}^{U_{th}} \int_{-\infty}^{\infty} f_{sn}(z-x)f_{ob}(x) dz dx. \quad (7)$$

Выше в качестве функции f_{sn} рассматривалась функция PDF в виде (2). Как уже было показано (см.рис.3 и 5), PDF такого вида хорошо описывает лазерную помеху, включая область больших значений («выбросов») сигнала помехи, что важно при оценке вероятности ложной тревоги. Однако использование PDF (2) для оценок вероятности пропуска цели приводит к определенным трудностям, связанным с вычислением интеграла (7). В связи с этим рассмотрим возможность использования гауссовой аппроксимации для функции $f(z)$, учитывая близость (в пределах нескольких процентов) обоих теоретических распределений при описании экспериментальных гистограмм сигнала лазерной помехи для $M \geq 2.0$. При этом в обоих распределениях параметр M определяется по среднему и среднеквадратичному значениям сигнала помехи, вычисляемым из этих гистограмм.

В случае гауссовой аппроксимации выражение для функции f_{sn} принимает вид

$$\begin{aligned} f_{sn} &= \frac{1}{\sigma_{sn} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(u-\bar{U})^2}{2\sigma_{sn}^2}\right] \\ &= \sqrt{\frac{M}{\pi}} \frac{1}{\bar{U}} \exp\left[-\frac{(u-\bar{U})^2}{\bar{U}^2} M\right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Для подтверждения возможности такой аппроксимации на рис.6 приведены следующие плотности вероятности распределения сигнала лазерной помехи: экспериментальная гистограмма (кружки), гамма-аппроксимация по формуле (2) (сплошные кривые) и гауссова аппроксимация по формуле (8) той же гистограммы (пунктир). Экспериментальные данные на рис.6,а получены при облучении макета ОЭС [1] излучением СО-лазера, а на рис.6,б – HF-лазера. При этом учитывалось, что для рис.6,а значения \bar{U} и σ_{sn} равны 0.0084 В и 0.0035 В, а для рис.6,б они составляют 0.0131 В и 0.0049 В соответственно. Параметр M вычислялся с использованием экспериментальных значений σ_{sn} и \bar{U} и выражения (3).

Выражение для вероятности ложной тревоги с использованием гауссовой аппроксимации (8) выглядит следующим образом:

$$P_{fa} = \int_{U_{th}}^{\infty} f_{sn}(u) du = \frac{1}{2} - \Phi((U_{th} - \bar{U})/\sigma_{sn}), \quad (9)$$

где

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx.$$

Табл.1. Вероятности ложной тревоги и пропуска цели при многоспектральном лазерном воздействии на макет ОЭС.

Тип лазера	σ_{sn} (В)	\bar{U} (В)	M	P_{fa} (5)	P_{fa} (9)	P_m (12)
HF-лазер	0.0025	0.0037	2.19	0.0094	1.44×10^{-6}	0
	0.0055	0.0073	1.76	0.1671	0.1127	8.75×10^{-4}
	0.0555	0.0954	2.95	0.9928	0.9832	0.2943
СО-лазер	0.0207	0.0297	2.05	0.8872	0.8121	0.0736
	0.0678	0.0934	1.90	0.9679	0.9553	0.329

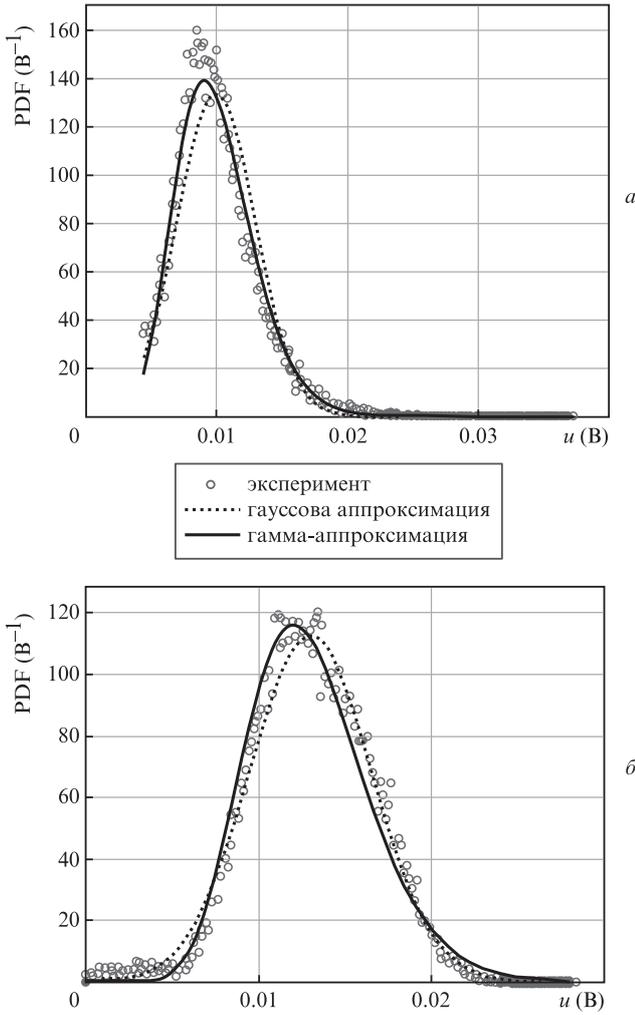


Рис.6. Плотности вероятности распределений сигнала лазерной помехи (см. текст).

В табл.1 представлены результаты расчета P_{fa} по формулам (5) и (9). Видно, что при гауссовой аппроксимации (8) вероятность ложной тревоги несколько ниже (на 3%–5%), чем при ее вычислении с использованием PDF в виде (2). Скорее всего, это обусловлено тем, что гауссова функция хуже описывает экспериментальную гистограмму сигнала лазерной помехи в области больших выбросов сигнала. На рис.7 приведены плотности вероятности распределения сигнала лазерной помехи в области больших выбросов сигнала при облучении макета ОЭС излучением HF-лазера и 2-й гармоники CO₂-лазера.

Далее, рассматривая вероятность пропуска цели, будем использовать в выражениях (6) и (7) в качестве функции f_{sn} гауссову аппроксимацию (8) распределения сигнала лазерной помехи. Полагая, что сигнал от цели является локальным и детерминированным, для f_{ob} воспользуемся модельным представлением в виде следующей δ -функции:

$$f_{ob}(u) = \delta(u - U_s - \bar{U}), \quad (10)$$

где учтен факт ненулевого среднего значения лазерной помехи (ступеньки), на величину которого при регистрации увеличивается полезный сигнал U_s .

В этом случае для плотности вероятности распределения $f(z)$ получим соотношение

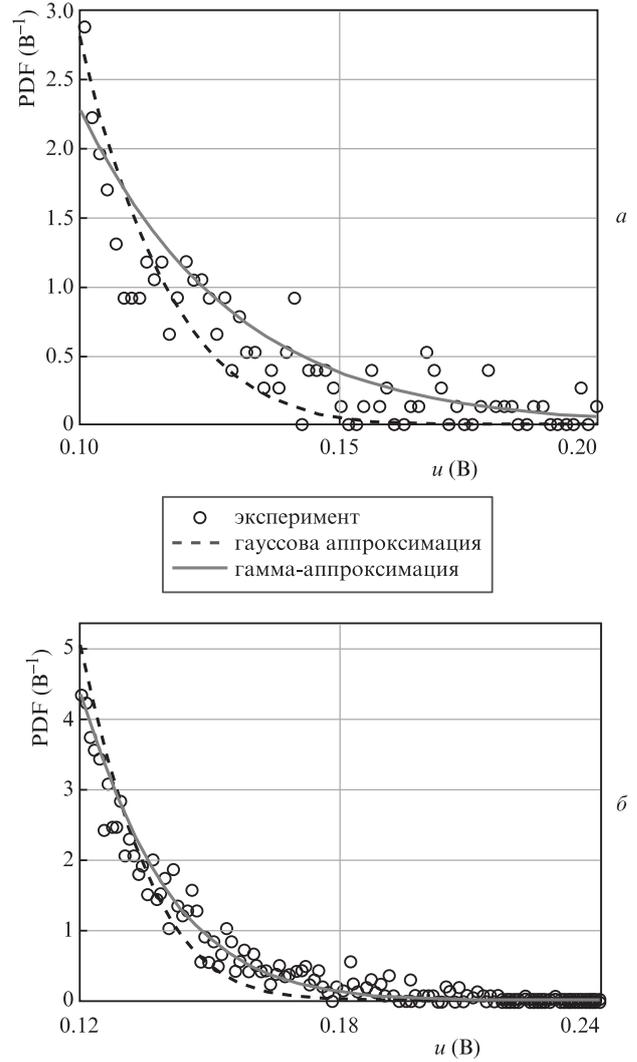


Рис.7. Плотности вероятности распределений сигнала лазерной помехи в области больших выбросов и их аппроксимации гамма-распределением и гауссовой функцией при воздействии на макет ОЭС излучением HF-лазера (а) и 2-й гармоники CO₂-лазера (б).

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{sn}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-\frac{[z - (u - \bar{U})]^2}{2\sigma_{sn}^2}\right\} \times \delta(u - U_s - \bar{U}) du = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{sn}} \exp\left[-\frac{(z - U_s)^2}{2\sigma_{sn}^2}\right]. \quad (11)$$

С учетом (11) для вероятности пропуска цели при распределении сигнала в виде δ -функции (10) имеем выражение

$$P_m = \int_{-\infty}^{U_{th}} f(z) dz = \frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{U_s - U_{th}}{\sigma_{sn}}\right). \quad (12)$$

Нетрудно видеть, что полученные выражения для вероятностей ложной тревоги (9) и пропуска цели (12) близки к классическим с той лишь разницей, что среднеквадратичное значение сигнала помехи σ_{sn} зависит от параметра M и наведенного лазерной помехой среднего напряжения (математического ожидания \bar{U}). В формуле (9) присутствует также аддитивная добавка в виде наведенного среднего напряжения \bar{U} . Соответствующие результаты расчета вероятности пропуска цели по формуле (12) представлены в табл.1, которая иллюстрирует полевое

Табл.2. Характеристики обнаружения сигнала на фоне лазерной помехи при изменении порогового напряжения U_{th} .

U_{th} (В)	SNR	P_m (12)	P_d	P_{fa} (9)
0.012	1	0.233	0.767	0.394
0.012	1.8	0.1	0.900	0.302
0.012	2.1	0.067	0.933	0.274
0.012	5.7	3.304×10^{-5}	1	0.044
0.02	1	0.291	0.709	0.326
0.02	1.8	0.175	0.825	0.193
0.02	2.1	0.136	0.864	0.159
0.02	5.7	0.002	0.998	0.002
0.03	1	0.373	0.627	0.250
0.03	1.8	0.309	0.692	0.097
0.03	2.1	0.274	0.726	0.067
0.03	5.7	0.077	0.923	9.557×10^{-6}

воздействие многоспектрального лазерного излучения на макет ОЭС.

В табл.2 приведены результаты расчетов с использованием выражений (9) и (12) обнаружительных характеристик ОЭС в условиях лазерной помехи при изменении порогового напряжения U_{th} . Сравниваются вероятности, соответствующие одинаковым значениям отношения сигнала к лазерной помехе (SNR). Как и выше, для расчетов использовались сигналы лазерной помехи, сформированной при внеполемом воздействии излучения CO_2 -лазера (2-я гармоника) на макет ОЭС [1]. В экспериментах сигнал от цели имел постоянную величину: $U_s = 0.04$ В, а такие величины, как среднее (\bar{U}) и среднеквадратичное (σ_{sn}) значения сигнала помехи, изменялись в зависимости от мощности излучения и режима лазерного воздействия.

Из табл.2 следует, что попытка уменьшить вероятность ложной тревоги при наличии лазерной помехи путем повышения порога обнаружения приводит к очевидному результату – увеличению вероятности пропуска цели и уменьшению вероятности ее правильного обнаружения.

В приведенных выше аналитических выражениях для расчета функциональных характеристик ОЭС обнаружения квазиточечного объекта наблюдения (цели) при воздействии лазерной помехи используются параметры \bar{U} и M , оцениваемые из модельных экспериментов.

4. Заключение

В работе представлен анализ лазерного воздействия на обнаружительные характеристики ИК ОЭС наблюдения квазиточечных объектов (целей). Функциональное воздействие обусловлено формированием лазерной помехи из-за рассеяния лазерного излучения на оптических и конструктивных элементах ОЭС с МФПУ. Исходя из проведенного анализа, предложен аналитический метод оценки как вероятности ложной тревоги, так и вероятности пропуска цели в условиях засветки фокальной матрицы рассеянным лазерным излучением. Этот метод основан на определении функции плотности вероятности распределения

сигнала лазерной помехи с параметрами \bar{U} (среднее значение зарегистрированного напряжения лазерной помехи на выходе МФПУ) и M (параметр, характеризующий статистические свойства рассеянного лазерного излучения, падающего на фокальную матрицу). Показано, что для нахождения вероятности ложной тревоги можно использовать аппроксимацию экспериментальных гистограмм в виде как гамма-распределения, так и функции Гаусса. При выводе выражения для вероятности пропуска цели применяется функция Гаусса.

Для априорного (без проведения модельных экспериментов) прогнозирования влияния лазерной помехи на обнаружительные характеристики ОЭС на основе приведенных выше зависимостей P_{fa} и P_m необходимо разработать расчетные модели для параметров \bar{U} и M . Теоретическое определение параметра \bar{U} при заданной облученности лазерным излучением входного зрачка оптической системы не представляет особых трудностей, за исключением расчета коэффициента пропускания (передачи) лазерного излучения в фокальную плоскость при внеполемом засветке. Однако сегодня этот расчет доступен практически для любой оптической системы при использовании программного пакета типа ZEMAX или специализированной программы (см., напр., [11]). Параметр M зависит как от степени когерентности падающего на входной зрачок ОЭС лазерного излучения, так и от условий формирования рассеянного излучения на фотоприемной матрице и преобразования его в сигналы напряжения. Разработка математической модели для оценки параметра M является, на наш взгляд, более сложной задачей и требует более подробного анализа статистических свойств спектров, возникающих при взаимодействии лазерного излучения с оптико-механическими элементами ОЭС [12], который может быть предметом дальнейших исследований.

Авторы выражают благодарность Л.А.Реянской за подготовку фактических материалов, полученных при обработке изображений лазерной помехи, регистрируемых МФПУ.

1. Асанов С.В., Игнатъев А.Б., Морозов В.В. и др. *Оптический журн.*, **79** (9), 23 (2012) [*J. Opt. Technol.*, **79**, 545 (2012)].
2. Асанов С.В., Егоров М.С., Игнатъев А.Б. и др. *Оптический журн.*, **81** (9), 62 (2014) [*J. Opt. Technol.*, **81**, 531 (2014)].
3. Schlijpen R.(H.)M.A., Dimmeler A., Eberle B., et al. *Proc. SPIE*, **6738**, 67380O (2007).
4. Durécu A., Bourdon P., Fleury D., et al. *Proc. SPIE*, **8187**, 81870K (2011).
5. Santos C.N., Chrétien S., Merella L., et al. *Proc. SPIE*, **10797**, 107970S (2018).
6. Hueber N., Vincent D., Morin A., et al. *Proc. SPIE*, **7660**, 766042 (2010).
7. Гудмен Дж. *Статистическая оптика* (М.: Мир, 1988).
8. Трищенко М.А. *Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов* (М.: Радио и связь, 1992).
9. Вошула И.В., Длугунович В.А., Жумарь А.Ю. *Научно-техн. ведомости СПбГПУ. Сер. Физ.-мат. науки*, **182** (4), Ч.1, 56 (2013).
10. Левин Б.Р. *Теоретические основы статистической радиотехники* (М.: Радио и связь, 1989).
11. Абакумова А.А., Малинова Т.П., Меденников П.А., Павлов Н.И. *Оптический журн.*, **86** (8), 56 (2019) [*J. Opt. Technol.*, **86**, 503 (2019)].
12. Попов И.А. *Докт. дис.* (С.-Петербург, СПБИТМО, 2000).