

УДК 623.624.2

Модель оптико-электронного средства как объекта функционального поражения мощным лазерным излучением

Глушков А. Н., Марченко А. В., Кулешов П. Е.

Постановка задачи: развитие лазерных комплексов актуализирует необходимость защиты от них оптико-электронных средств. Это определяет необходимость проведения исследований поражения оптико-электронных средств мощным лазерным излучением с целью выявления способов защиты. **Целью работы** является разработка модели, позволяющей определять влияние параметров оптико-электронных средств, лазерных комплексов и условий их функционирования на защищенность оптико-электронных средств от поражающего излучения лазерных комплексов. **Новизна работы** определяется учетом основных внутрисистемных и внешнесистемных связей системы «оптико-электронное средство – лазерный комплекс», позволяющих проводить исследования показателя защиты оптико-электронного средства в зависимости от собственных параметров, основных параметров лазерного комплекса и условий их функционирования. **Результат:** на основе рассмотрения системы «оптико-электронное средство – лазерный комплекс» как совокупности целостного множества составляющих их элементов, разработана математическая модель оптико-электронного средства как объекта функционального поражения мощным лазерным излучением при моноимпульсном воздействии, представляющая формализованное описание вероятности поражения в зависимости от условий воздействия, параметров, а также конструктивных особенностей средства и объекта поражения. **Практическая значимость:** полученные выражения адекватно отражают процесс транспортировки лазерной энергии на оптико-электронное средство и могут служить основой для определения параметров функционирования оптико-электронных средств.

Ключевые слова: защита, функциональное поражение, оптико-электронное средство, мощное лазерное излучение.

Введение

Функциональное поражение (ФП) оптико-электронных средств (ОЭС) мощным лазерным излучением (МЛИ) в настоящее время рассматривается как эффективный способ обеспечения выигрыша в конфликте информационных систем в оптическом диапазоне длин волн [1, 2, 3]. Поэтому исследования закономерностей процесса ФП представляют интерес с позиции обеих сторон, участвующих в конфликте, поскольку полученные результаты создают основу как для средств ФП, так и для средств защиты ОЭС. Выявление упомянутых закономерностей определяет необходимость разработки математических моделей, учитывающих основные особенности ФП ОЭС МЛИ и представляющих формализованное описание показателей эффективности поражения в зависимости от условий воздействия, параметров, а также конструктивных особенностей средства и объекта ФП.

Библиографическая ссылка на статью:

Глушков А. Н., Марченко А. В., Кулешов П. Е. Модель оптико-электронного средства как объекта функционального поражения мощным лазерным излучением // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 1. С. 62-76. DOI: 10.24411/2410-9916-2021-10103.

Reference for citation:

Glushkov A. N., Marchenko A. V., Kuleshov P. E. Model of Functional Destruction of an Opto-Electronic Facility with High-Energy Laser Radiation. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 1, pp. 62-76 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2021-10103.

Целью статьи является разработка модели ОЭС как объекта ФП МЛИ, представляющей формализованное описание показателя эффективности ФП при моноимпульсном лазерном воздействии, в зависимости от параметров лазерного излучения, состояния атмосферы и конструктивных особенностей ОЭС. Для достижения сформулированной цели исследований будем полагать, что лазерный комплекс, предназначенный для ФП ОЭС включает в себя лазерный лоцатор разведки ОЭС, подсистему управления, систему формирования и наведения МЛИ, а также мощную лазерную установку.

Постановка задачи

При решении сформулированной задачи будем исходить из того, наиболее уязвимым элементом ОЭС является фотоприемное устройство (ФПУ) [4]. Поэтому можно считать, что поражение ОЭС МЛИ возникает при выполнении условия [5, 6]:

$$E \geq E_{\text{пор}}, \quad (1)$$

где E и $E_{\text{пор}}$ – энергия лазерного излучения на ФПУ ОЭС и минимальное ее значение необходимое для вывода ФПУ из строя с заданной вероятностью.

Учитывая случайный характер взаимодействия лазерного излучения с ФПУ, а также случайность величины E , связанной с частичной когерентностью лазерного излучения [6, 7], ошибками формирования его диаграммы направленности [6], турбулентностью атмосферы [8] и рядом других факторов вероятность выполнения условия (1) можно принять в качестве оценки вероятности поражения ОЭС P_n при облучении МЛИ. Таким образом, вероятность поражения ОЭС МЛИ имеет смысл вероятности облучения ОЭС энергией E не ниже порогового уровня $E_{\text{пор}}$ и может быть рассчитана по формуле:

$$P_n = 1 - P(E \leq E_{\text{пор}}) = 1 - \int_0^{E_{\text{пор}}} W(E) dE, \quad (2)$$

где $W(E)$ – закон распределения флуктуаций энергии лазерного излучения.

Геометрическая схема ФП ОЭС представлена на рис. 1.

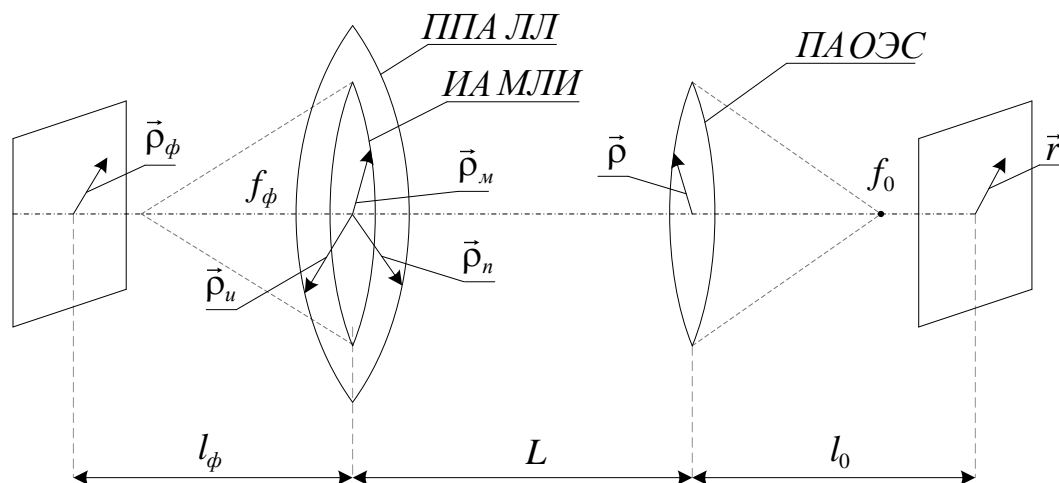


Рис.1. Геометрическая схема ФП ОЭС

На рис. 1 приняты следующие обозначения: ППА ЛЛ – приемно-передающая апертура лазерного локатора; ИА МЛИ – излучающая апертура МЛИ; $\vec{\rho}_u, \vec{\rho}_n, \vec{\rho}_m$ – радиус-векторы, характеризующие положение точек на излучающей и приемных апертурах ЛЛ и МЛИ соответственно; $\vec{\rho}_\phi$ – радиус-вектор, характеризующий положение точки в плоскости наблюдения ЛЛ; f_ϕ – фокусное расстояние приемной линзы ЛЛ; L – дальность ФП; ПА ОЭС – приемная апертура ОЭС; $\vec{\rho}, \vec{r}$ – радиус-векторы, характеризующие положение точек на ПА ОЭС и в плоскости его наблюдения; f_0 – фокусное расстояние приемной линзы ОЭС; a, a_n, a_m, a_0 – эффективные радиусы ППА ЛЛ, МЛИ и ОЭС соответственно; l_ϕ, l_0 – расстояние между плоскостью приемной апертуры и наблюдения лазерного локатора и ОЭС соответственно.

Исходя из изложенного, задача построения модели ОЭС как объекта ФП сводится к нахождению зависимости показателя эффективности P_n от параметров МЛИ, ОЭС, а также условий их функционирования. В данной задаче можно выделить две частных задачи. Первая состоит в построении модели транспортировки лазерной энергии на ОЭС. При ее решении обычно задаются способом управления параметрами волнового фронта МЛИ [9]. В настоящее время к наиболее распространенным из указанных способов относится наведение коллимированного излучения путем управления его наклоном волнового фронта на излучающей апертуре [10]. Поэтому именно этот способ исследуется в настоящей работе. Вторая из упомянутых задач состоит в формализации взаимодействия ОЭС с лазерной энергией, определяемого зависимостью вероятности ФП ОЭС от его параметров, величины доставленной на него энергии и внешних условий. Результаты математической формализации перечисленных задач представляют собой частные модели и излагаются ниже совместно с результатами анализа именно в указанной последовательности.

1. Частная модель процесса наведения МЛИ на ОЭС

Наведение МЛИ на ОЭС представляет собой процесс управления углом наклона волнового фронта лазерного пучка на излучающей апертуре с целью эффективного поражения ОЭС. Как правило, это достигается, когда оптическая ось излучения совпадает с оптической осью ОЭС. Точностные характеристики данного процесса определяются точностью формирования управляющих воздействий на исполнительные устройства наведения и точностью работы последних. Потенциальная точность наведения МЛИ на ОЭС σ_α^2 определяется точностью пеленгации последнего σ_{oc}^2 . Именно она является предметом математической формализации в настоящей частной модели.

Пеленгация ОЭС в поле зрения локатора разведки с использованием метода максимального отношения правдоподобия осуществляется по положению энергетического центра тяжести отраженного от ОЭС сигнала в плоскости наблюдения локатора [11]. При этом точность оценки положения упомянутого максимума определяет точность оценки направления на ОЭС.

Входной сигнал $x(\vec{\rho}, t)$ лазерного локатора на приемной апертуре представляет собой аддитивную смесь, состоящую из принимаемого локационного полезного сигнала $s(\vec{\rho}, t)$ и фонового излучения $n(\vec{\rho}, t)$ со спектральной плотностью мощности N_0 :

$$x(\vec{\rho}, t) = s(\vec{\rho}, t) + n(\vec{\rho}, t), \quad (3)$$

$$\langle s(\vec{\rho}, t) \rangle = 0; \langle n(\vec{\rho}, t) \rangle = 0,$$

$$\langle s_o(\vec{\rho}_1, t_1, \vec{r}_\alpha) s_o^*(\vec{\rho}_2, t_2, \vec{r}_\alpha) \rangle = \Gamma_2(\vec{\rho}_1, t_1, \vec{\rho}_2, t_2; \vec{m}_\alpha), \quad (4)$$

$$\langle s(t_1) s(t_2) \rangle = P_c R_c(t_1, t_2); \langle n(t_1) n(t_2) \rangle = N_0 \delta(t_1 - t_2).$$

Здесь $R_c(\cdot)$ – нормированная корреляционная функция сигнала; P_c – средняя мощность полезного сигнала.

Будем считать закон распределения $x(\vec{\rho}, t)$ гауссовским со статистическими характеристиками, определяемыми (4). Здесь знак $\langle \rangle$ – обозначает операцию статистического усреднения; знак «*» – означает операцию комплексного сопряжения; $\Gamma_2(\cdot)$ – пространственно-временная функция когерентности второго порядка полезного сигнала; \vec{r}_α – случайный вектор, определяющий направление на ОЭС; $\langle \vec{r}_\alpha \rangle = \vec{m}_\alpha$; $\langle (\vec{r}_\alpha - \vec{m}_\alpha)^2 \rangle = \sigma_\alpha^2$.

В соответствии с известными результатами теории оценивания [12] оптимальная оценка угловых координат изображения объекта методом максимального отношения правдоподобия является корнем уравнения:

$$\vec{r}_{ou} = \text{Arg max } L(\vec{r} | \vec{r}_\alpha), \quad (5)$$

где $L(\vec{r} | \vec{r}_\alpha)$ – логарифм функционала отношения правдоподобия локационного сигнала в плоскости наблюдения локатора, положение точки в которой характеризуется вектором \vec{r} .

Для модели локационного наблюдения ОЭС [13] уравнение (5) сводится к следующему виду [14]:

$$\vec{r}_{ou} = \int_{\pm\infty} \vec{r} x(\vec{\rho}, t, \vec{r}_\alpha) T(\vec{\rho}, \vec{r}) d\vec{\rho} d\vec{r} / \int_{\pm\infty} x(\vec{r}, t, \vec{r}_\alpha) T(\vec{\rho}, \vec{r}) d\vec{\rho} d\vec{r}, \quad (6)$$

где $T(\vec{\rho}, \vec{r})$ – функция пропускания излучения приемной оптикой локатора, задаваемая в расчетах выражением [8]:

$$T(\vec{\rho}, \vec{r}) = T_0 \exp \left(-\vec{\rho}^2 / 2a_n^2 - i \frac{k}{l_\phi} \vec{\rho} \vec{r} + ik \left(\frac{1}{l_\phi} - \frac{1}{f_\phi} \right) \vec{\rho}^2 \right), \quad (7)$$

где T_0 – амплитудный коэффициент пропускания излучения приемной линзой; i – мнимая единица.

При унимодальном распределении величины $\Gamma_2(\vec{r}, t, \vec{r}, t; \vec{m}_\alpha)$ искомая оценка является несмещенной, $\langle \vec{r}_{ou} \rangle = \langle \vec{r}_\alpha \rangle = \vec{m}_\alpha$ [15] и наибольший практический интерес представляет анализ ее дисперсии, определяемой выражением:

$$\sigma_{ou}^2 = \left\langle \frac{\int_{\pm\infty} \vec{r}_1 \vec{r}_2 x(\vec{\rho}_1, t_1, \vec{r}_\alpha) x(\vec{\rho}_2, t_2, \vec{r}_\alpha) T(\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2, \vec{r}_1, \vec{r}_2) d\vec{\rho}_{1,2} d\vec{r}_{1,2}}{\int_{\pm\infty} x(\vec{r}_1, t_1, \vec{r}_\alpha) x(\vec{r}_2, t_2, \vec{r}_\alpha) T(\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2, \vec{r}_1, \vec{r}_2) d\vec{\rho}_{1,2} d\vec{r}_{1,2}} \right\rangle,$$

где $\vec{r}_{1,2}$ – радиусы векторы, характеризующие положение точек на фотоприемнике ОЭС, которое при $\langle \vec{r}_\alpha \rangle = \vec{m}_\alpha = 0$, в соответствии с [11] сводится к виду:

$$\vec{r}_{ou} = \int_{S_\phi} \vec{r} x(\vec{\rho}, t, \vec{r}_\alpha) T(\vec{\rho}, \vec{r}) d\vec{\rho} d\vec{r} / \int_{S_\phi} x(\vec{r}, t, \vec{r}_\alpha) T(\vec{\rho}, \vec{r}) d\vec{\rho} d\vec{r}, \quad (8)$$

$$\sigma_{ou}^2 \approx \frac{1}{2} a_\alpha^2 (1 + K_u), \quad (9)$$

где $K_u = \frac{N_0}{P_0}$ – отношение шум-сигнал в плоскости наблюдения локатора;

$P_0 = \pi a_\alpha^2 I_0$; a_α – эффективный радиус изображения ОЭС в плоскости наблюдения локатора; I_0 – интенсивность излучения в центре изображения ОЭС;

$S_\phi = \pi a_\phi^2$; a_ϕ – радиус фотоприемника.

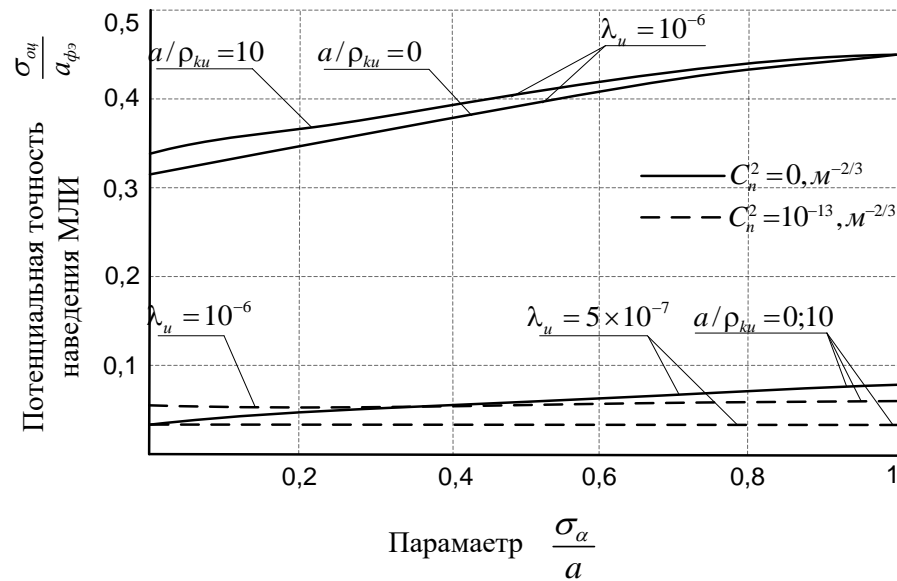
Зависимость от времени в (9) опущена потому что, во-первых, лазерный сигнал обычно факторизуется [7, 16], а во-вторых, постоянная времени фотоприемников, применяемых в системах лазерной локации, существенно меньше времени корреляции флуктуаций локационного сигнала.

Таким образом, при оценке потенциальной точности наведения МЛИ на ОЭС получен известный в теории радиолокации результат [17]. Он состоит в том, что минимальная дисперсия ошибки наведения МЛИ на ОЭС пропорциональна площади изображения отраженного сигнала в плоскости наблюдения локатора разведки. Физическое содержание этого результата заключается в следующем. Упомянутая площадь изображения ограниченного сигнала определяет зону неопределенности, в которой находится оцениваемый параметр (точка прицеливания) и именно размер указанной зоны определяет потенциальную точность его оценивания. Последняя тем выше, чем больше отношение сигнал-шум. Полученное выражение (9) показывает, что потенциальная точность наведения МЛИ на ОЭС в случайно неоднородной среде определяется дифракционными параметрами зондирующего излучения ($a, \rho_{ku}, \lambda_u, F$) и приемного объектива локатора (a_n, f_ϕ, l_ϕ), точностью наведения зондирующего излучения на ОЭС (σ_α^2), характеристиками трассы распространения излучения (L, C_n^2), параметрами приемного объектива лоцируемого ОЭС (a_0, a_r, l_0, f_0), где a_r – эффективный радиус приемника ОЭС, а также энергетическими характеристиками наблюдаемой реализации поля, характеризующимися отношением шум-сигнал K_u .

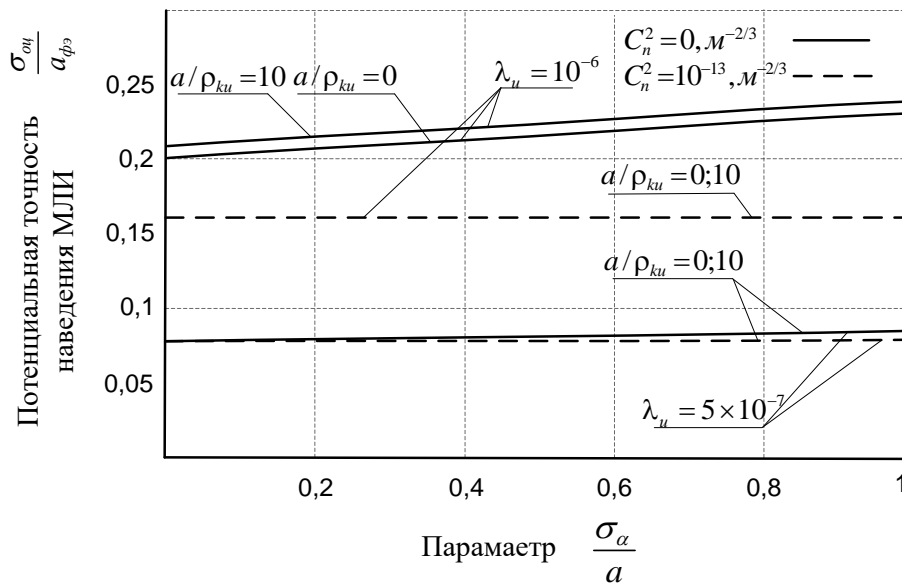
На рис. 2 представлены результаты расчетов величины $\frac{\sigma_{ou}}{a_{\phi\alpha}}$ в

зависимости от величины угловых флуктуаций диаграммы направленности излучения локатора при различных дифракционных параметрах зондирующего излучения и интенсивности флуктуаций показателя преломления воздуха. На графиках величина σ_{ou} нормирована на эффективный радиус элемента разрешения в плоскости наблюдения локационной системы $a_{\phi\alpha}$. Расчеты выполнены для частного случая, когда отражатель находится в плоскости резкого

изображения ОЭС, зондирующее излучение представляет собой коллимированный пучок с длиной волны $5 \cdot 10^{-7}$ и 10^{-6} м, а дальности локации равны $L=1000$ м и $L=3500$ м.



а)



б)

Рис. 2. Зависимость потенциальной точности наведения МЛИ на ОЭС от угловых флуктуаций диаграммы направленности зондирующего излучения локатора: а) $L=1000$ м; б) $L=3500$ м

Из представленных графических зависимостей видно, что потенциальная точность наведения МЛИ на ОЭС тем хуже, чем меньше дальность локации и выше дисперсия угловых флуктуаций диаграммы направленности зондирующего излучения локатора относительно ОЭС $\frac{\sigma_\alpha^2}{a^2}$, а также чем хуже его пространственная когерентность и больше длина волны. Это связано с тем, что с умень-

шением дальности локации, а также увеличением длины волны зондирующего излучения λ_u и ухудшением его пространственной когерентности увеличивается дифракционный размер изображения ОЭС, что приводит к ухудшению потенциальной точности пеленгации ОЭС и, как следствие ухудшению потенциальной точности наведения МЛИ.

Другой результат состоит в том, что увеличение интенсивности турбулентности атмосферы приводит к улучшению потенциальной точности наведения МЛИ на ОЭС. Этот результат связан эффектом усиления обратного рассеяния [8]. Он будет обсуждаться при анализе частной модели взаимодействия МЛИ и ОЭС и здесь не рассматривается. Данные результаты подтверждаются исследованиями зависимости потенциальной точности пеленгации ОЭС от светосилы его объектива, определяемой отношением $K_{CB} = a_0 / f_0$ (рис. 3).

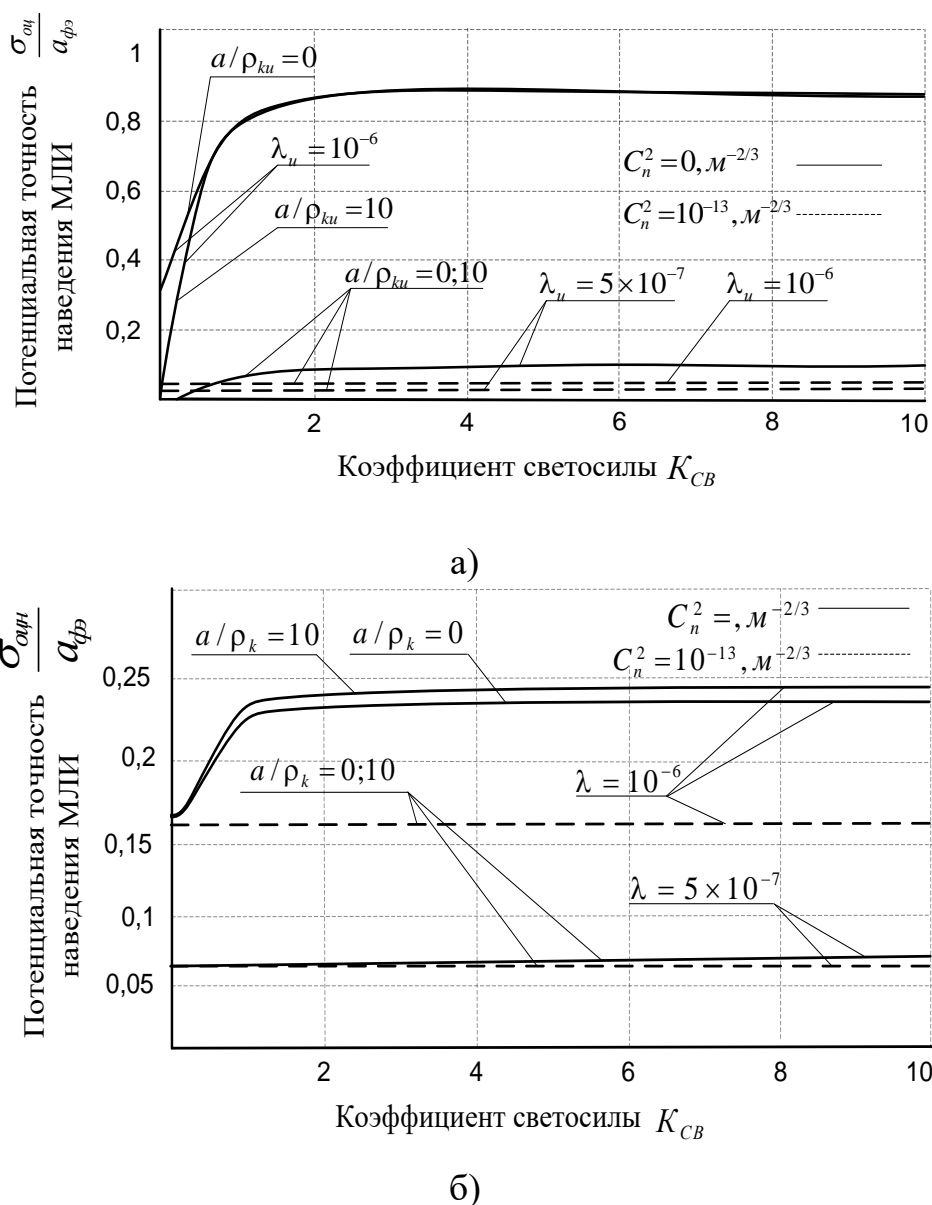


Рис. 3. Зависимость потенциальной точности наведения МЛИ на ОЭС от светосилы его объектива: а) $L=1000$ м; б) $L=3500$ м

В дополнение к приведенным на рис. 3 зависимостям они показывают, что точность наведения МЛИ на ОЭС тем хуже, чем выше светосила приемной оптики объекта локации. Это объясняется тем, что увеличение светосилы оптических систем связано с увеличением относительного радиуса их входного зрачка, которое приводит к увеличению радиуса изображения отраженного сигнала при локации ОЭС и, как следствие, к ухудшению точности пеленгации.

Установленные закономерности соответствуют физическому содержанию рассматриваемой задачи. Это позволяет использовать определяющие их расчетные соотношения, для оценки потенциальной точности наведения лазерного излучения на ОЭС, исходя из условий работы лазерного комплекса и его параметров.

2. Частная модель взаимодействия ОЭС с МЛИ

Для формализации зависимости и показателя эффективности ФП ОЭС МЛИ (2) от их параметров и условий функционирования будем исходить, из того, что флуктуация поля лазерного пучка в турбулентной атмосфере имеют нормальное распределение [6, 7], что позволяет аппроксимировать функцию $W(E)$ экспоненциальным законом [6], с учетом которого (2) преобразуется к следующему виду:

$$P_n = 1 - \exp\left(-\frac{\langle E \rangle}{E_{нор}}\right), \quad (10)$$

где $\langle E \rangle$ – среднее значение энергии МЛИ в плоскости наблюдения ОЭС (ФПУ),

$$\langle E \rangle = \int_0^{T_e} dt \int_{S_\phi} d^2r \Gamma_2(\vec{r}, \vec{r}, t, t), \quad (11)$$

где T_e – длительность воздействия; S_ϕ – площадь фоточувствительного слоя фотоприемника; $\Gamma_2(\vec{r}_1, \vec{r}_2, t_1, t_2)$ – пространственно-временная корреляционная функция МЛИ на ФПУ; t – текущее время.

Полагая временную зависимость поля МЛИ во всех точках ПА ОЭС одинаковой [6], выражение (4) при $T_e = \tau_u \gg \tau_k$ преобразуем как:

$$\langle E \rangle = \int_{S_\phi} d^2r \Gamma_2(\vec{r}, \vec{r}, l_0) \int_0^{\tau_u} b(t) dt = \tau_u \int_{S_\phi} d^2r \Gamma_2(\vec{r}, \vec{r}, l_0), \quad (12)$$

где $\Gamma_2(\vec{r}_1, \vec{r}_2, l_0)$ – функция пространственной когерентности мощного лазерного пучка в плоскости фотоприемника ОЭС; $b(t)$ – временная корреляционная функция флуктуаций МЛИ; τ_k – время корреляции флуктуаций МЛИ.

Таким образом, частная модель взаимодействия ОЭС с МЛИ сводится к формализации показателя P_n в зависимости от параметров функции пространственной когерентности МЛИ на ФПУ ОЭС.

Для решения этой задачи, поступая аналогично [7, 8], определим функцию когерентности МЛИ в плоскости приемника излучения и на входной апертуре ОЭС выражением:

$$\Gamma_2(l_\phi, \vec{R}_\phi, \vec{\rho}_\phi) = \left(\frac{k}{2\pi l_\phi} \right) \exp \left(\frac{ik}{l_\phi} \vec{R}_\phi \vec{\rho}_\phi \right) \int_{-\infty}^{\infty} d^2 R_n \rho_n d^2 T \left(\lambda_m; \vec{R}_{nm} - \frac{\vec{\rho}_{nm}}{2} \right) \times \quad (13)$$

$$\times T \left(\lambda_m; \vec{R}_{nm} + \frac{\vec{\rho}_{nm}}{2} \right) \Gamma_2(L, \vec{R}_{nm}, \vec{\rho}_{nm}) \exp \left(\frac{ik}{l_\phi} \left(1 - \frac{l_0}{f_0} \right) \vec{R}_0 \vec{\rho}_0 + \frac{ik}{l_\phi} (\vec{R}_0 \vec{\rho}_{nm} + \vec{R}_{nm} \vec{\rho}_0) \right),$$

где $T(\cdot)$ – амплитудный коэффициент пропускания эквивалентного приемного объектива ОЭС с фокусным расстоянием f_0 ; $\vec{R}_0 = \frac{1}{2} (\vec{r}_1 + \vec{r}_2)$; $\vec{\rho}_0 = \vec{r}_1 - \vec{r}_2$; $k = \frac{2\pi}{\lambda_m}$; L – дальность ФП ОЭС; $\vec{R}_\phi, \vec{\rho}_\phi, \vec{R}_{nm}, \vec{\rho}_{nm}, \vec{R}_0, \vec{\rho}_0$ – суммарный и разностный радиус-векторы, описывающие положение точек на ЛЛ, излучающей и приемной апертурах МЛИ и ОЭС соответственно; λ_m – длина волны МЛИ.

$$\Gamma_2(L, \vec{R}_0, \vec{\rho}_0) = T_a(L) \left(\frac{k}{2\pi l} \right)^2 \int_{-\infty}^{\infty} d^2 R_{nm} d^2 \rho_{nm} \Gamma_2(0, \vec{R}_{nm}, \vec{\rho}_{nm}) \times \quad (14)$$

$$\times \exp \left(\frac{ik}{L} (\vec{R}_{nm} - \vec{R}_0) (\vec{\rho}_{nm} - \vec{\rho}_0) - \frac{\pi k^2}{4} \int_0^1 d\xi H [(1-\xi)\vec{\rho}_{nm} + \xi\vec{\rho}_0] \right)$$

где $T_a(L)$ – коэффициент, определяющий прозрачность атмосферы; $\Gamma_2(0, \vec{R}_{nm}, \vec{\rho}_{nm})$ – функция когерентности второго порядка источника МЛИ; $H(\xi, \vec{\rho}) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \vec{\chi} (1 - \cos \vec{\chi} \rho) \Phi_n(\xi, \vec{\chi})$; $\Phi_n(\xi, \vec{\chi})$ – пространственный спектр флуктуаций диэлектрической проницаемости воздуха.

Для $T(\vec{\rho}_0)$ и $\Gamma_2(0, \vec{R}_{nm}, \vec{\rho}_{nm})$ воспользуемся моделями, определяемыми следующими выражениями [7, 8]:

$$T(\lambda_m, \vec{\rho}_0) = T_{0\lambda_m} \exp \left(- \frac{\rho_0^{-2}}{2a_0^2} \right), \quad (15)$$

$$\Gamma_2(\vec{R}_{nm}, \vec{\rho}_{nm}) = U_0^2 \exp \left\{ - \frac{R_{nm}^2}{a_m^2} - \frac{\rho_{nm}^2}{4a_m^2} \left(1 - \frac{a_m^2}{\rho_{км}^2} + 2k^2 \sigma_{\alpha m}^2 \right) - \frac{ik}{F} \vec{R}_{nm} \vec{\rho}_{nm} - \frac{ik \vec{\rho}_{nm} |\vec{n}_0 \vec{m}_{\alpha m}|}{a_m^2} \right\}, \quad (16)$$

где $T_{0\lambda_m}$ – спектральный коэффициент пропускания излучения эквивалентной приемной линзы ОЭС; U_0 – амплитуда поля МЛИ в центре излучающей апертуры лазерного средства ФП; $\rho_{км}, a_m$ – эффективные радиусы пространственной когерентности и излучающей апертуры МЛИ; $m_{\alpha m}, \sigma_{\alpha m}^2$ – математическое ожидание и дисперсия ошибки наведения МЛИ на ОЭС; F – радиус кривизны волнового фронта МЛИ.

Подставляя (15) и (16) в (11), с учетом (13) и (14) для пространственного спектра флуктуаций диэлектрической проницаемости воздуха вида [7, 8] $\Phi_n(\xi, \vec{\chi}) = 0,093 C_n^2(\xi) (\chi)^{-1/3}$, в результате интегрирования получим:

$$\langle E_n \rangle = \frac{T_a(L)T_{0\lambda_m}}{\left(1 + \frac{a_{nm}^2}{a_0^2}\right)} \exp \left[-\frac{m_{\alpha}^2}{a_0^2} \left[\frac{1 + \vartheta_4 \frac{\Omega_l^2 a_m^2}{\vartheta_5 a_0^2} \left(1 + \frac{a_{nm}^2}{a_0^2}\right)}{\left(1 + \frac{a_0^2}{a_{nm}^2}\right)} \right] \right], \quad (17)$$

где $\langle E_n \rangle = \frac{\langle E \rangle \tau_{um}^{-1}}{\pi U_0^2 a_m^2}$; $\frac{a_0^2}{a_m^2} = \left(1 - \frac{L}{F}\right)^2 + \Omega^{-2} \left(1 + \frac{a_m^2}{\rho_{km}^2} + \frac{2\sigma^2}{a_m^2} \Omega^2 + 4a_m^2 \omega_2\right)$; $\Omega_0 = \frac{k_m a_0^2}{L}$;

$$\vartheta_1 = \left(1 - \frac{L}{F}\right) \frac{\Omega}{2} - 2a_m^2 \omega_3 \Omega^{-1}; \quad \vartheta_2 = 1 - \frac{l_0}{f_0} + \frac{l_0}{L} \left(1 - 2\vartheta_1 \Omega^{-1} \frac{a_m^2}{a_0^2}\right); \quad \vartheta_4 = \frac{2a_0^2}{a_{nm}^2} \vartheta_1 \Omega^2 - \frac{\vartheta_2}{1 + \frac{a_0^2}{a_L^2}};$$

$$\vartheta_3 = \frac{a_m^2}{a_0^2} + \Omega^2 + 4\omega_1 a_m^2 - 4\vartheta_1^2 \frac{a_m^2}{a_0^2}; \quad \vartheta_5 = \vartheta_3 + \frac{\vartheta_2^2 \Omega_l^2}{\frac{a_L^2}{a_m^2} \left(1 + \frac{a_L^2}{a_{nm}^2}\right)}; \quad \omega_1 = \rho_{nB}^{-1} \int_0^1 d\xi \left[\frac{C_n^2(\xi L)}{C_{n0}^2} \right]^{6/5};$$

$$\omega_2 = \rho_{nB}^{-1} \int_0^1 d\xi (1 - \xi)^2 \left[\frac{C_n^2(\xi L)}{C_{n0}^2} \right]^{6/5}; \quad \omega_3 = \rho_{nB}^{-1} \int_0^1 d\xi \xi (1 - \xi) \left[\frac{C_n^2(\xi L)}{C_{n0}^2} \right]^{6/5}; \quad \rho_{nB} = [0,365 k_m^2 L C_{n0}^2]^{-3/5};$$

$$\Omega_l = \frac{k_m a_0^2}{l_0},$$

где $C_n^2(\xi L)$ – структурная характеристика флуктуаций диэлектрической проницаемости воздуха вдоль трассы распространения излучения; C_{n0}^2 – структурная характеристика флуктуаций диэлектрической проницаемости воздуха в окрестности излучающей апертуры лазерного средства ФП.

3. Анализ эффективности воздействия МЛИ на ОЭС

Проанализируем поведение вероятности P_n (2), а также величины $\langle E_n \rangle$ (17) в зависимости от параметров МЛИ и оптической схемы приемного канала ОЭС, а также интенсивности турбулентности атмосферы. Упомянутые зависимости представлены на рис. 4 и 5.

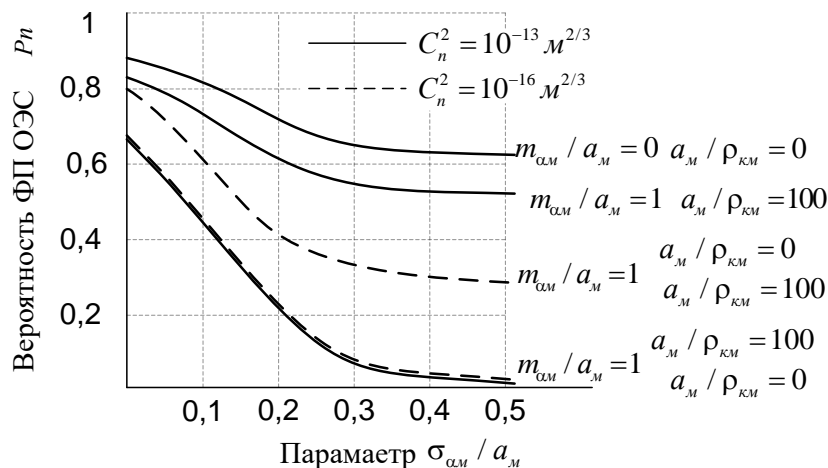


Рис. 4. Зависимость вероятности ФП ОЭС P_n от параметров МЛИ

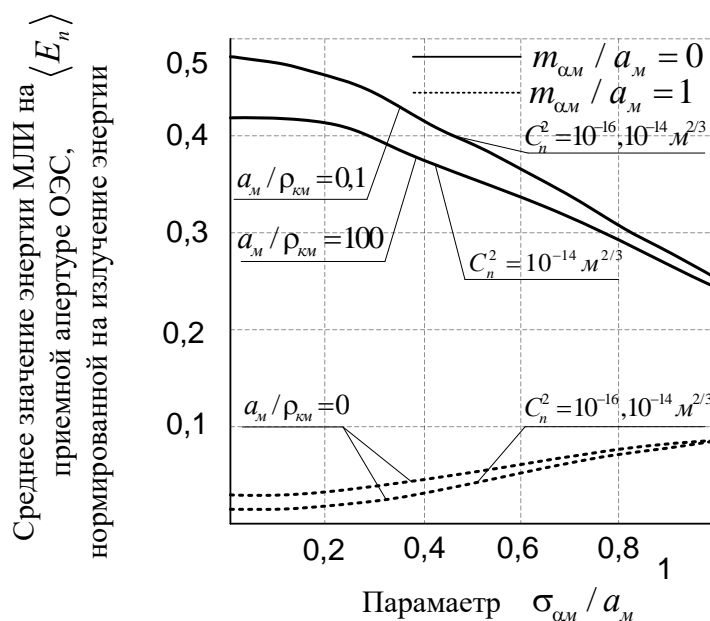


Рис. 5. Зависимость величины $\langle E_n \rangle$ от параметров МЛИ

Они получены для коллимированного излучения однородной трассы при: $C_n^2(\xi L) = C_{n0}^2$; $\lambda_m = 10^{-6} M$; $C_{n0}^2 = (10^{-13} \dots 10^{16}) M^{-2/3}$; $L = 3,5 \cdot 10^3 M$; $a_{nm} / a_0 = 0,1$; $l_0 / f_0 = 1$; $P_{пор} / P_m = 10^{-5}$, ($P_m = \pi a_m^2 U_0^2$, $P_{пор} = E_{пор} \tau_{ум}^{-1}$).

Приведенные зависимости показывают, что вероятность ФП ОЭС МЛИ P_n (рис. 4 и 5) тем больше, чем шире сам пучок (меньше Ω) и лучше его пространственная когерентность. Это связано с тем, что с увеличением Ω или с уменьшением $a_m / \rho_{км}$ происходит уменьшение пятна его подсвета и в пятне возрастает плотность световой энергии. Как следствие, величина $\langle E_n \rangle$ становится более чувствительной к отклонениям пучка от точки прицеливания. При увеличении флуктуационной составляющей ошибки нацеливания величина $\langle E_n \rangle$ может быть максимизирована. Некоторая противоречивость данного результата обуславливается следующим. Увеличение флуктуационной составляющей ошибки нацеливания эквивалентно расфокусировке МЛИ в плоскости приемной апертуры ОЭС. При этом очевидно, что при больших смещениях пятна подсвета от точки прицеливания, энергия излучения на последней может быть максимизирована за счет ее расфокусировки. Расчеты показывают, что она должна быть тем больше, чем шире пучок, выше степень его пространственной когерентности, а также чем меньше интенсивность турбулентности атмосферы. Другими словами, турбулентность атмосферы, вызывая уширение пучка, несколько «стирает» влияние ошибок наведения на $\langle E_n \rangle$ и вероятности P_n . В целом, влияние атмосферной турбулентности на эффективность защиты ОЭС от лазерной энергии растет с увеличением когерентности излучения, уменьшая длина его волны и радиус приемной апертуры ОЭС.

Выводы

Разработана математическая модель ОЭС как объекта ФП МЛИ, представляющая формализованное описание вероятности поражения ОЭС при моноим-

пульсном воздействии в зависимости от условий воздействия параметров, а также конструктивных особенностей ОЭС. Полученные выражения адекватно отражают процесс транспортировки лазерной энергии на ОЭС и могут служить основой для определения параметров функционирования средства ФП.

В результате моделирования установлено:

- вероятность поражения ОЭС МЛИ определяется количеством лазерной энергии, принятой фотоприемником от лазерного источника, которая, в свою очередь, зависит от точности наведения лазерного излучения на ОЭС;
- потенциальная точность наведения МЛИ на ОЭС пропорциональна площади изображения, отраженного от ОЭС сигнала в плоскости наблюдения лоатора разведки лазерного комплекса, она тем выше, чем больше отношение сигнал-шум. Кроме того, точность наведения МЛИ на ОЭС меняется при увеличении длины волны зондирующего излучения лоатора и ухудшения его пространственной когерентности;
- увеличение интенсивности флуктуаций показателя преломления воздуха приводит к увеличению точности наведения лазерного излучения на ОЭС и, как следствие, увеличению вероятности поражения ОЭС;
- вероятность ФП ОЭС МЛИ тем выше, чем больше радиусы излучающей апертуры и пространственной когерентности МЛИ.

Данные результаты соответствуют физическому содержанию решаемой задачи и свидетельствуют о качественной адекватности разработанной модели объекта исследования.

Литература

1. Будников С. А., Гревцев А. И., Иванцов А. В., Кильдюшевский В. М., Козирацкий А. Ю., Козирацкий Ю. Л., Кущев С. С., Лысиков В. Ф., Паринов М. Л., Прохоров Д. В. Модели информационного конфликта средств поиска и обнаружения. Монография / под ред. Ю. Л. Козирацкого. – М.: Радиотехника, 2013. – 232 с.
2. Добынкин В. Д., Куприянов А. И., Пономарев В. Г., Шустов Л. Н. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / под ред. А. И. Куприянова. – М.: Вузовская книга, 2007. – 468 с.
3. Военная энциклопедия: в 8 томах / под ред. И. Д. Сергеева. Том 5: Маркировка боеприпасов – «Огайо». – М.: Военное издательство, 2001. – 575 с.
4. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. – Л.: Машиностроение, 1983. – 696 с.
5. Якушенков Ю. Г., Луканцев В. Н., Колосов М. П. Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах. – М.: Радио и связь, 1981. – 180 с.
6. Никитин В. М., Гаранин С. Г., Фомин В. Н. Адаптивная помехозащита оптико-электронных датчиков (для систем управления и навигации). – М.: Издательство Московского университета, 2011. – 336 с.
7. Ахманов С. А., Дьяков Ю. Г., Чиркин А. С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. – М.: Наука, 1981. – 640 с.
8. Зуев В. Е., Банах В. А., Покасов В. В. Оптика турбулентной атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 271 с.

9. Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. Принципы адаптивной оптики. – М.: Наука, 1986. – 335 с.
10. Глушков А. Н., Стрельцова Л. В. Начальные моменты выбросов параметра Штеля при адаптивной коррекции светового пучка // Оптический журнал. 1992. № 3. С. 10-13.
11. Бакут П. А., Мандросов В. И., Матвеев И. Н., Устинов Н. Д. Теория когерентных изображений / под ред. Н. Д. Устинова. – М.: Радио и связь, 1987. – 264 с.
12. Акимов П. С., Бакут П. А., Богданович П. А. Теория обнаружения сигналов / под ред. П. А. Бакута. М.: Радио и связь, 1984. – 440 с.
13. Глушков А. Н., Кравцов Р. Н., Митрофанов А. Л. Модель локационного наблюдения ОЭС // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2006. № 7. С. 23-27.
14. Левшин В. Л. Пространственная фильтрация в оптических системах пеленгации. – М.: Радио и связь, 1971. – 200 с.
15. Троицкий И. Н., Устинов И. Н. Статистическая теория голографии. – М.: Радио и связь, 1981. – 327 с.
16. Перица Я. Когерентность света. – М.: Мир, 1974. – 367 с.
17. Ширман Я. Д., Голиков В. Н. Основы теории обнаружения радиолокационных сигналов и измерения их параметров. – М.: Советское радио, 1963. – 278 с.

References

1. Budnikov S. A., Grevcev A. I., Ivancov A. V., Kil'dyushevskij V. M., Kozirackij A. Yu., Kozirackij Yu. L., Kushchev S. S., Lysikov V. F., Parinov M. L., Prohorov D. V. *Modeli informacionnogo konflikta sredstv poiska i obnaruzheniya. Monografija* [Models of information conflict of search and detection tools. Monography]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2013. 232 p. (in Russian).
2. Dobkin V. D., Kupriyanov A. I., Ponomarev V. G., Shustov L. N. *Radioehlektronnaya bor'ba. Silovoe porazhenie radioehlektronnykh sistem* [Electronic warfare. Power destruction of radio-electronic systems]. Moscow, Vuzovskaya kniga Publ., 2007. 468 p. (in Russian).
3. Sergeev I. D. *Voennaya ehntsiklopediya: v 8 tomakh Tom 5: Markirovka boepripasov – «Ogajo»*. [Military encyclopedia in 8 volumes. Volume 5: Marking ammunition - "Ohio"]. Moscow, Voennoe izdatel'stvo Publ., 2001. 575 p. (in Russian).
4. Miroshnikov M. M. *Teoreticheskie osnovy optiko-ehlektronnykh priborov* [Theoretical foundations of optoelectronic devices]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1983. 696 p. (in Russian).
5. Yakushenkov Yu. G., Lukantsev V. N., Kolosov M. P. *Metody bor'by s pomekhami v optiko-ehlektronnykh priborakh* [Methods of interference control in optoelectronic devices]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1981. 180 p. (in Russian).
6. Nikitin V. M., Garanin S. G., Fomin V. N. *Adaptivnaya pomekhozashhita optiko-ehlektronnykh datchikov (dlya sistem upravleniya i navigatsii)* [Adaptive noise protection of optoelectronic sensors (for control and navigation systems)]. Moscow, Moscow State University Publ., 2011. 336 p. (in Russian).

7. Akhmanov S. A., Dyakov Yu. G., Chirkin A. S. *Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku i optiku* [Introduction to statistical radiophysics and optics]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 640 p. (in Russian).

8. Zuev V. E., Banakh V. A., Pokasov V. V. *Optika turbulentnoj atmosfery*. [Optics of the turbulent atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988. 271 p. (in Russian).

9. Vorontsov M. A., Schmalhausen V. I. *Printsipy adaptivnoj optiki* [Principles of adaptive optics]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 335 p. (in Russian).

10. Glushkov A. N., Streltsova L. V. Nachal'nye momenty vybrosov parametra Shtelya pri adaptivnoj korrektsii svetovogo puchka [Initial moments of outliers of the Stehl parameter in adaptive correction of a light beam]. *Journal of Optical Technology*, 1992, no. 3, pp. 10-13 (in Russian).

11. Bakut P. A., Mandrosov V. I., Matveev I. N. *Teoriya kogerentnyh izobrazhenij*. [Theory of coherent images]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1987. 264 p. (in Russian).

12. Akimov P. S., Bakut P. A., Bogdanovich P. A. *Teoriya obnaruzheniya signalov* [Theory of signal detection]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1984. 440 p. (in Russian).

13. Glushkov A. N., Kravcov R. N., Mitrofanov A. L. Model' lokacionnogo nablyudeniya OES [Model of OEM location surveillance]. *Information-measuring and control systems*, 2006, no. 7, pp. 23-27 (in Russian).

14. Levshin V. L. *Prostranstvennaya fil'tratsiya v opticheskikh sistemakh pelengatsii* [Spatial filtration in optical direction finding systems]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1971. 200 p. (in Russian).

15. Troitsky I. N., Ustinov I. N. *Statisticheskaya teoriya golografii* [Statistical theory of holography]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1981. 327 p. (in Russian).

16. Perina Ya. *Kogerentnost' sveta* [Coherence of light]. Moscow, Mir Publ., 1974. 367 p. (in Russian).

17. Shirman Ya. D., Golikov V. N. *Statisticheskaya teoriya golografii* [Fundamentals of the theory of radar signal detection and measurement of their parameters]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1963. 278 p. (in Russian).

Статья поступила 9 ноября 2020 г.

Информация об авторах

Глушков Александр Николаевич – доктор технических наук. Старший научный сотрудник отдела научно-исследовательского центра. Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина». Область научных интересов: информационный конфликт оптико-электронных систем. E-mail: angl243@yandex.ru

Марченко Александр Васильевич – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адыюнк. Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина». Область научных интересов: информационный конфликт оптико-электронных систем. E-mail: mav89202125904@yandex.ru

Кулешов Павел Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент. Начальник отдела научно-исследовательского центра. Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина». Область научных интересов: информационный конфликт оптико-электронных систем. E-mail: pekulesh@yandex.ru

Адрес: 394052, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54А.

Model of Functional Destruction of an Opto-Electronic Facility with High-Energy Laser Radiation

A. N. Glushkov, A. V. Marchenko, P. E. Kuleshov

Problem statement: *The development of laser systems dictates the necessity to seek for the ways of protecting optoelectronic equipment against them. One of the efficient ways of counteracting the laser systems' influence is to protect optoelectronic facilities against high-energy laser radiation. This search triggers research efforts related to destruction of optoelectronic facilities by high-energy laser radiation in order to find methods of their protection. The aim of the work is to develop a model that enables us to determine the effect of parameters of optoelectronic equipment and laser systems as well as their operational conditions in order to protect optoelectronic equipment against destructive high-energy laser radiation emitted by a laser system. The novelty of the work lies in taking account of the main internal and external relations of the system "optoelectronic facility-laser system" that allow a measure of protection for an optoelectronic facility to be studied depending on its intrinsic parameters, basic parameters of a laser system and their operational conditions. The result: Treating the conflict "optoelectronic facility-laser system" as the integrity of components a model has been developed for an optoelectronic facility as an objective of functional destruction by high-energy laser radiation emitted in the monopulse mode. The suggested model represents a formal description of the destruction probability depending on parameters, operational environment and design features of both the destruction facility and the objective to be destroyed. Practical significance: The obtained expressions adequately represent the transmission of laser energy to an optoelectronic facility and can serve as a basis for determining operational parameters of the functional destruction facility.*

Keywords: *protection, functional destruction, optic-electronic facility, high-energy laser radiation.*

Information about Authors

Aleksandr Nikolaevich Glushkov – Dr. habil. of Engineering Sciences. Senior Researcher of Department of Scientific Center. Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh). Field of research: information conflict of optical-electronic systems. E-mail: angl243@yandex.ru

Aleksandr Vasil'evich Marchenko – Doctoral student. Postgraduate student. Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh). Field of research: information conflict of optical-electronic systems. E-mail: Mav89202125904@yandex.ru

Pavel Evgen'evich Kuleshov – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent. Head of Department of Scientific Center. Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh). Field of research: information conflict of optical-electronic systems. E-mail: pekulesh@yandex.ru

Address: Russia, 394052, Voronezh, Starykh Bol'shevikov str., 54A