

УДК 623.624.2

Модель оптико-электронного средства как объекта разведки

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

Постановка задачи: развитие комплексов лазерного оружия актуализирует необходимость защиты от них оптико-электронных средств. Одним из эффективных способов противодействия является скрытие объекта защиты от подсистем разведки таких комплексов, что определяет необходимость проведения исследований разведдоступности оптико-электронных средств с целью выявления способов ее снижения. **Целью работы** является разработка модели, позволяющей определять влияние параметров оптико-электронных средств, лазерных средств разведки и условий их функционирования на скрытность оптико-электронных средств от лазерных средств разведки. **Новизна работы** определяется учетом основных внутрисистемных и внесистемных связей системы «оптико-электронное средство – лазерное средство разведки», позволяющих проводить исследования показателей скрытности оптико-электронного средства в зависимости от собственных параметров, основных параметров лазерного средства разведки и условий их функционирования. **Результат:** на основе рассмотрения системы «оптико-электронное средство – лазерное средство разведки» как совокупности целостного множества составляющих их элементов, разработана модель оптико-электронного средства как объекта разведки, включающая частные модели отраженного от оптико-электронного средства сигнала, его оптимального приемника, а также поиска оптико-электронного средства. **Практическая значимость:** установленные закономерности позволяют количественно оценить вклад технических параметров конфликтующих сторон на показатели скрытности оптико-электронных средств и, как следствие, корректно обосновывать их значения и режимы работы.

Ключевые слова: модель, скрытность функционирования, оптико-электронное средство, лазерное средство разведки, разведдоступность, виды поиска.

1. Введение

В настоящее время в высокоразвитых странах активно разрабатываются комплексы лазерного оружия (КЛО) [1]. Разведка объектов поражения осуществляется ими на больших дальностях – радиолокационными станциями, а на малых дальностях – с помощью лазерных средств разведки (ЛСР) [2]. Отражение лазерного излучения от оптико-электронных средств (ОЭС), за счет высокой эффективной площади рассеяния ОЭС для ЛСР, может приводить к увеличению дальности обнаружения носителя ОЭС в несколько раз [3]. Это обстоятельство ведёт к повышению вероятности поражения как ОЭС, так и самого носителя мощным лазерным излучением. Одним из эффективных способов противодействия КЛО является защита ОЭС от средств их разведки. Это определяет необходимость проведения исследований разведдоступности ОЭС с целью выявления способов ее снижения. Под разведдоступностью ОЭС понима-

Библиографическая ссылка на статью:

Глушков А. Н., Дробышевский Н. В., Кулешов П. Е. Модель оптико-электронного средства как объекта разведки // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 1. С. 82-99. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10105

Reference for citation:

Glushkov A. N., Drobyshevskij N. V., Kuleshov P. E. Model of Optical-Electronic Means as an Object of Intelligence. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 1, pp. 82-99. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10105 (in Russian).

ется совокупность свойств ОЭС, определяющих реализацию возможностей технических средств разведки по получению информации об излучательных и отражательных характеристиках ОЭС [4]. Исследование разведдоступности ОЭС определяет необходимость разработки модели, позволяющей определять влияние исходных тактико-технических данных ОЭС, ЛСР и условий их функционирования на эффективность обнаружения ОЭС средствами разведки.

2. Модель оптико-электронного средства как объекта разведки

Эффективность разведки объектов достаточно полно характеризуется вероятностью успешного завершения их поиска за заданное время [5]. Поэтому построение модели ОЭС как объекта разведки будем осуществлять на основе математической формализации указанного показателя. В соответствии с принципами лазерной локации [6] это требует разработки частных математических моделей формирования отраженного от ОЭС сигнала в плоскости наблюдения ЛСР, его оптимального приемника, а также поиска ОЭС ЛСР за заданное время. Именно в такой последовательности производится решение сформулированной задачи. Рассмотрение проводится для пассивных ОЭС, поскольку они имеют широкое распространение в различных сферах человеческой деятельности.

2.1. Частная модель отраженного от ОЭС сигнала

Рассмотрим общий случай, когда ОЭС находится на расстоянии L от ЛСР, ориентированной в общем случае на ОЭС с некоторой ошибкой. Геометрическая схема разведки ОЭС лазерной локационной станцией приведена на рис. 1.

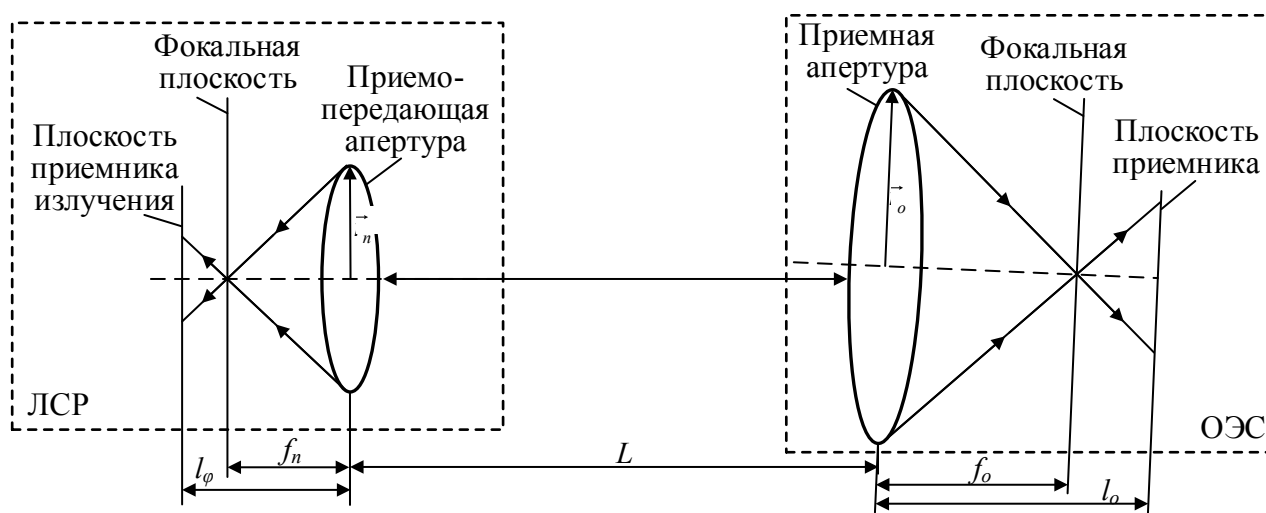


Рис. 1. Геометрическая схема разведки ОЭС

В большинстве практических задач синтез и анализ локационных систем требует аналитического описания второго момента принимаемого локатором поля (функции когерентности). Вид данной функции в плоскости приемной апертуры лазерной локационной системы с использованием фазового приближения обобщенного метода Гюйгенса-Кирхгофа [7] найден и проанализирован в

[8]. Ниже мы остановимся на определении ее вида в плоскости наблюдения лазерного локатора за приемной линзой. Для этого воспользуемся связью между распределением комплексной амплитуды поля $\varepsilon_c(l_\varphi, \bar{\rho})$ в произвольной плоскости на расстоянии l_φ за приемным объективом и падающим на него полем $u(L, \bar{R}_n)$, определяемой соотношением [7]:

$$\varepsilon_c(l_\varphi, \bar{\rho}) = \frac{k}{2\pi i l_\varphi} \exp\left(ikl_\varphi + \frac{ik}{2} \frac{\rho^2}{l_\varphi}\right) \int_{-\infty}^{\infty} T_n(\bar{R}_n) u(L, \bar{R}_n) \times \\ \times \exp\left(-\frac{ik}{l_\varphi} \bar{R}_n \bar{\rho} + \frac{ik}{2l_\varphi} \left(1 - \frac{l_\varphi}{f_n}\right) R_n^2\right). \quad (1)$$

Здесь $k=2\pi/\lambda$; λ – длина волны излучения; f_n – фокусное расстояние; $T_n(R_n)$ – амплитудный коэффициент пропускания объектива радиуса a_n (рис. 1).

Формула для распределения функции когерентности отраженного от ОЭС поля на приемной апертуре лазерного локатора, полученная для гауссовских моделей диаграмм направленности прямо-передающих систем при условии, что отражение в ОЭС происходит в плоскости резкого изображения имеет вид [8]:

$$\Gamma_n(R_n, \rho_n, L) = \frac{U_0^2 T_o^2}{\left(1 + \nu_1 \frac{a^2}{a_0^2}\right) \nu_5 \nu_{10} \nu_{13} l_o^2} \exp\left(-\frac{R_n^2}{a^2 \nu_{13}} - \frac{\rho_n^2}{4a^2} \Omega_L^2 \left(\frac{\nu_{11}^2}{\nu_{10}} - \frac{\nu_{14}^2}{\nu_{13}} - \frac{\nu_8^2}{\nu_5} + \right.\right. \\ \left. + \frac{16a^4 \omega^2}{\Omega_L^4 \nu_1 \left(1 + \nu_1 \frac{a^2}{a_0^2}\right)} - \frac{16a^4 \omega^2}{\Omega_L^4 \nu_1}\right) - \frac{m_o^2}{a^2} \left(\frac{1}{\nu_1} - \frac{1}{\nu_1 \left(1 + \nu_1 \frac{a^2}{a_0^2}\right)} + \frac{\nu_6^2}{\nu_5} - \frac{\nu_6^2 L^2}{\nu_5^2 \nu_{10} l_o^2} + \frac{\nu_{15}^2}{\nu_{13}}\right) + \\ \left. + i\Omega_L \frac{R_n \rho_n}{a^2} \left(1 - \frac{\nu_{14}}{\nu_{13}}\right) + i \frac{R_n \rho_n}{a^2} \frac{\nu_{15}}{\nu_{13}} + i\Omega_L \frac{m_o^2 \rho_n}{a^2} \left(\frac{\nu_6 \nu_8}{\nu_5} - \frac{\nu_6 \nu_{11} L}{\nu_5 \nu_{10} l_o} + \frac{\nu_{15} \nu_{14}}{\nu_{13}}\right)\right), \quad (2)$$

где U_0 – амплитуда поля в центре излучающей апертуры ЛСР; T_o – амплитудный коэффициент пропускания объектива ОЭС; R_n, ρ_n – суммарный и разностный радиус-векторы соответственно, характеризующие положение точек на приемной апертуре ЛСР; a – эффективный радиус излучающей апертуры; a_0 – эффективный радиус приемной апертуры ОЭС; m_o и σ_o – математическое ожидание и дисперсия ошибки наведения излучения ЛСР на ОЭС; ρ_k, F – радиусы когерентности и кривизны волнового фронта излучения ЛСР; a_r – эффективный радиус отражателя;

$$\nu_1 = \nu + 4a^2 \Omega_L^{-1} \omega + q_u^2, \quad \nu = \Omega_L^{-2} \left(1 + \left(\frac{a}{\rho_k}\right)^2 + \frac{2\sigma_o^2}{a^2} + q_u^2\right), \quad q_u = 1 - L/F, \\ \nu_5 = \frac{\nu_3^2}{\nu_1^{-1} + \frac{a^2}{a_o^2}} + 4a^2 \omega / \Omega_L^2 + a^2 / (a_o^2 \Omega_L^2) + 1 - \frac{\nu_2^2}{\nu_1 \Omega_L^2}, \quad \nu_3 = \nu_2 / \nu_1, \quad \nu_2 = \frac{4a^2 \omega}{\Omega_L} - q_u \Omega_L, \\ \nu_{10} = \left(\frac{L}{l_o}\right)^2 \nu_5^{-1} + \frac{a^2}{a_o^2} \left(1 + \frac{a_o^2}{a_r^2}\right), \quad \nu_{13} = \frac{\nu_{12}^2}{\nu_{10}} - \frac{\nu_7^2}{\nu_{10}} + \frac{4a^2 \omega}{\Omega_L^2} \left(1 - \frac{4a^2 \omega}{\Omega_L^2 \nu_1}\right), \quad \nu_{12} = \frac{\nu_7 L}{\nu_5 l_o},$$

$$\begin{aligned}v_7 &= \frac{v_3 v_4}{v_1^{-1} + a^2 / a_o^2} - \frac{4a^2 \omega}{\Omega_L} (1 - v_3), \quad v_4 = \frac{L}{l_o} - \frac{4a^2 \omega}{\Omega_L}, \quad \Omega_L = \frac{ka^2}{L}, \quad v_{11} = \frac{v_8 L}{v_5 l_o} - 1, \\v_8 &= \frac{4a^2 \omega}{\Omega_L} \left(\frac{v_3}{1 + v_1 a^2 / a_o^2} + (1 - v_3) \right), \quad \omega = 1 / 3 \rho_0^2, \quad v_6 = \frac{v_3}{v_1} \left(v_1^{-1} + \frac{a^2}{a_o^2} \right)^{-1} - \frac{v_2}{v_1 \Omega_L}, \\v_{14} &= \frac{v_{11} v_{12}}{v_{10}} - \frac{v_7 v_8}{v_5} + \frac{4a^2 \omega}{\Omega_L^2} \left(1 - \frac{4a^2 \omega}{\Omega_L^2 v_1} \right) + \frac{4a^2 \omega v_4}{\Omega_L^2 \left(1 + v_1 \frac{a^2}{a_o^2} \right)}, \\v_{15} &= \frac{4a^2 \omega}{\Omega_L^2 v_1} + \frac{v_6}{v_5} \left(\frac{v_{12} L}{v_{10} l_o} - v_7 \right) + \frac{v_4}{1 + v_1 a^2 / a_o^2}.\end{aligned}$$

С учетом (1 и 2) функция когерентности поля, отраженного от ОЭС, после прохождения приемного объектива ЛСР имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\Gamma_2(l_\varphi, R_\varphi, \rho_\varphi) &= \frac{U_0^2 T_o^2 T_L^2}{\alpha v_5 v_{10} v_{13} l_\varphi^2} \frac{a_n^2}{a_\varphi^2} \xi_1^{-1} \xi_2^{-1} \exp \left(-\frac{m_o^2 \xi_4}{a_\varphi^2} - \frac{R_\varphi^2}{a_\varphi^2 \xi_2} - \frac{\rho_\varphi^2}{4a_\varphi^2} \Omega_\varphi^2 \frac{\xi_5}{\xi_1} + \right. \\&\quad \left. + i \frac{\rho_\varphi m_o^2}{a_\varphi^2} \xi_6 + i \Omega_\varphi \frac{R_\varphi \rho_\varphi}{a_\varphi^2} \xi_7 - 2 \frac{R_\varphi m_o^2}{a_\varphi^2} \frac{\xi_3}{\xi_2 \Omega_\varphi} \right),\end{aligned}\quad (3)$$

где: T_L – амплитудный коэффициент пропускания объектива локатора; R_φ , ρ_φ – суммарный и разностный радиус-векторы соответственно, характеризующие положение точек на приемнике локатора; a_φ – эффективный радиус приемника локатора;

$$\begin{aligned}\alpha &= 1 + v_1 \frac{a^2}{a_o^2}, \quad \Omega_\varphi = \frac{ka_\varphi^2}{l_\varphi}, \quad \xi_1 = 1 + \frac{a_n^2}{a^2 v_{13}}, \quad \xi_2 = \frac{a_n^2}{a_\varphi^2} \left(\frac{q_{ln}^2}{\xi_1} + \frac{a^4}{a_n^4} \frac{l_\varphi^2}{L^2} \left(\Omega_L^{-2} + \frac{a_n^2}{a^2} \theta \right) \right), \\q_{ln} &= 1 - \frac{l_\varphi}{f_n} + \frac{l_\varphi}{L} (1 - \theta_2), \quad \xi_3 = \frac{a_\varphi^2}{a_n^2} \left(\frac{a_n^2}{a^2} \theta_4 - \Omega_\varphi \frac{q_{ln}}{2\xi_1} \frac{a_n^4}{a^2 a_\varphi^2} \right), \quad \xi_5 = \frac{a_n^2}{a_\varphi^2} \left(1 - \frac{q_{ln}^2}{\xi_1 \xi_2} \frac{a_n^2}{a^2} \right), \\ \xi_4 &= \frac{a_\varphi^2}{a^2} \left(\theta_1 - \frac{\theta_3^2}{4\xi_1} \frac{a_n^2}{a^2} \right) + \frac{\xi_3}{\xi_2} \Omega_\varphi^2, \quad \xi_6 = \frac{\Omega_\varphi a_n^2}{\xi_1 a^2} - 2 \frac{q_{ln} \xi_3}{\xi_2} \frac{a_n^2}{a^2}, \quad \xi_7 = 1 - \frac{q_{ln}}{\xi_1 \xi_2} \frac{a_n^2}{a^2} \Omega_\varphi^{-1}, \\ \theta &= \frac{4a^2 \omega}{\Omega_L^2} \left(1 - \frac{4a^2 \omega}{\Omega_L^2} \left(1 - \left(1 + \frac{a^2}{a_o^2} \right)^{-1} \right) + \frac{v_{11}^2}{v_{10}} - \frac{v_8^2}{v_5} - \frac{v_{14}^2}{v_{13}} \right), \\ \theta_1 &= v_1^{-1} - \frac{1}{v_1 \alpha} + \frac{v_6^2}{v_5} - \frac{L^2}{l_o^2} \frac{v_6^2}{v_5 v_{10}} + \frac{v_{15}^2}{v_{13}}, \quad \theta_2 = \frac{v_{14}}{v_{13}}.\end{aligned}$$

Полученные выражения позволяют вычислить средние интенсивность и мощность принимаемого локатором сигнала, отраженного от ОЭС:

$$I(l_\varphi, R_\varphi) = \Gamma_2(l_\varphi, R_\varphi, \rho_\varphi = 0), \quad P_c(l_\varphi) = \int_{S_\varphi} \Gamma_2(l_\varphi, R_\varphi, \rho_\varphi = 0) d^2 R_\varphi, \quad (4)$$

где S_φ – площадь приемника локатора. Данные выражения будут использоваться в дальнейшем для оценки характеристик обнаружения ОЭС.

С использованием полученных выражений были проведены расчеты зависимости значений показателя эффективности локации ОЭС $\eta = I(R_\varphi) / I_0$ (I_0 – осевая интенсивность излучения) от характеристик локатора, ОЭС и состояния атмосферы. Указанные зависимости приведены на рис. 2, 3 при условии наблюдения локационного сигнала в плоскости резкого изображения. Основные

параметры ЛСР, ОЭС и условий их функционирования, принятые при расчетах параметра η , приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры ЛСР, ОЭС и условий их функционирования

Параметры ЛСР	
Длина волны зондирующего излучения, м	$1,06 \times 10^{-6}$
Импульсная мощность зондирующего излучения, Вт	10^6
Длительность импульса зондирующего излучения, с	10^{-8}
Угловая расходимость зондирующего излучения, рад	10^{-3}
Радиус излучающей зондирующее излучение апертуры, м	0,05
Радиус принимающей зондирующее излучение апертуры, м	0,1
Радиус приемника, м	10^{-3}
Радиус пространственной когерентности зондирующего лазерного пучка, м	10^{-3}
Фокусное расстояние объектива, м	0,1
Продолжительность ориентации мгновенного поля локатора в одном направлении, с	10^{-6}
Время приема и анализа отраженного сигнала, с	10^{-6}
Параметры ОЭС	
Радиус приемной апертуры, м	0,05
Радиус приемника, м	10^{-3}
Фокусное расстояние объектива, м	0,05
Спектральный диапазон, м	$4 \times 10^{-7} \dots 7 \times 10^{-7}$
Угол поля зрения приемника, рад	0,006
Параметры трассы распространения излучения	
Длина трассы, м	1000

На рис. 2 представлены зависимости показателя η от радиуса когерентности зондирующего излучения ρ_k при нулевой дисперсии ошибки наведения. Зависимости 1, 2, 3, 4 соответствуют значениям показателя эффективности на приемной апертуре, зависимости 5, 6, 7, 8 – значениям показателя в плоскости изображения. На рис. 3 представлены зависимости показателя η от дисперсии смещения пучка в плоскости изображения σ_o/a . Зависимости 1, 2, 3, 4 соответствуют слабой турбулентности, зависимости 5, 6, 7, 8 – сильной турбулентности. На рис. 2 и 3 зависимости 1, 5 соответствуют значению $m_o/a = 0$; зависимости 2, 6 – $m_o/a = 0,1$; зависимости 3, 7 – $m_o/a = 0,2$; зависимости 4, 8 – $m_o/a = 0,3$.

Полученные результаты свидетельствуют, что при $\Omega_\varphi^{-1} + \Omega_L^{-1} + \Omega_n^{-1} \approx 1$ для коллимированного когерентного (или близкого к нему $a / \rho_k \leq 1$) зондирующего излучения с увеличением флуктуаций показателя преломления воздуха возникает эффект усиления обратного рассеяния (рис. 3), т.е. величина η становится больше 1 из-за корреляций флуктуаций в прямом и отраженном сигналах. Это согласуется с результатами исследования статистических характеристик локационного излучения в турбулентной атмосфере [7] и свидетельствуют об адекватности разработанной модели физической сущности исследуемого процесса. Ошибки наведения зондирующего излучения на ОЭС, как и следовало ожидать, нивелируют упомянутый эффект (рис. 2). Это объясняется тем, что прямое и отраженное излучение проходят по разным

турбулентным неоднородностям, и степень корреляции между указанными сигналами уменьшается.

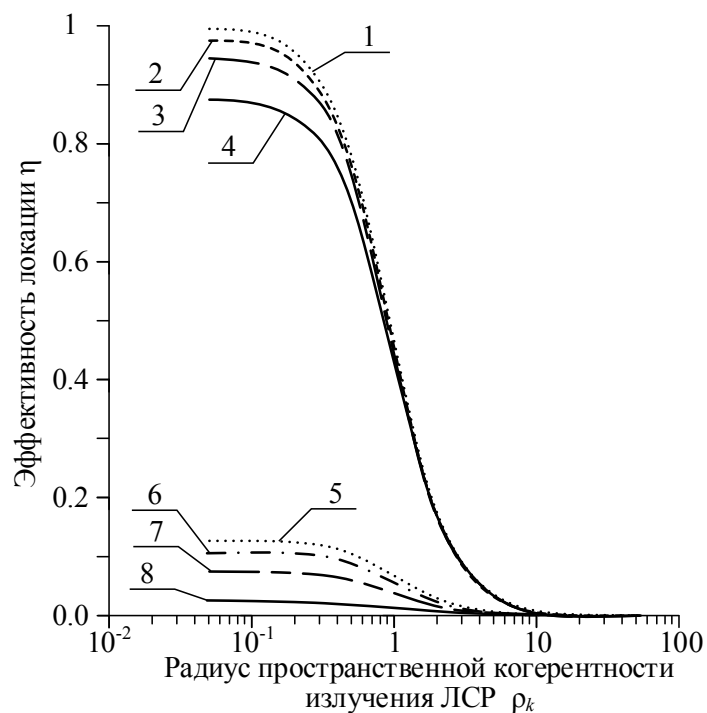


Рис. 2. Зависимость показателя η от ρ_k для различных отношений m_o/a при расчете показателя η на приемной апертуре и в плоскости изображения

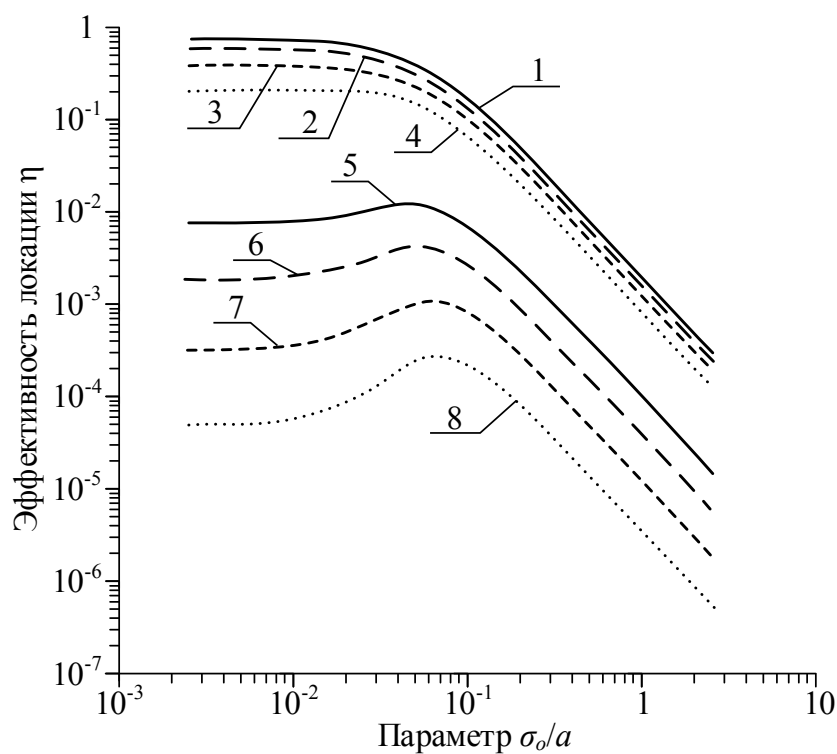


Рис. 3. Зависимость показателя η от σ_o/a для различных отношений m_o/a при сильной и слабой турбулентности атмосферы

Любопытной является зависимость η от σ_o/a при $a/\rho_k=0$ и $m_o/a=0$ (рис. 3), которая заключается в том, что с ростом σ_o/a возникает эффект усиления обратного рассеяния. Такое поведение указанных кривых может быть объяснено следующим. Увеличение флуктуационной составляющей ошибки наведения эквивалентно увеличению расходимости зондирующего излучения. При наличии систематической ошибки наведения пучка на ОЭС с ростом его расходимости увеличивается количество коррелированных неоднородностей в прямом и отраженном излучении. Это и приводит к максимизации кривых 5-8 на рис. 3.

В целом, полученные результаты свидетельствуют о том, что учет ошибок наведения лазерного излучения на ОЭС в модели их локационного наблюдения является значимым при анализе лазерных локационных систем.

2.2. Частная модель оптимального приемника отраженного от ОЭС сигнала

Эффективность оптимального приемника отраженного от ОЭС сигнала определяется статистическими характеристиками его обнаружения. Их нахождение связано со статистическим синтезом оптимального приемника (ОП) [9]. Для построения модели ОП воспользуемся результатами работ [10], в которых показано, что ОП лазерного локатора разведки ОЭС представляет собой последовательно соединенные оптимальные фильтры пространственных и временных частот, образованные соответственно приемным оптическим трактом и электронной схемой обработки принимаемого сигнала. Это позволяет представить передаточную функцию ОП в виде:

$$V_{оп}(R_\varphi, \rho_\varphi, t_1, t_2) = V_{пр}(R_\varphi, \rho_\varphi) V_{вр}(t_1, t_2),$$

где $V_{пр}(R_\varphi, \rho_\varphi)$ и $V_{вр}(t_1, t_2)$ – весовые функции пространственного и временного фильтров.

В классе гауссовских сигналов $V_{пр}(R_\varphi, \rho_\varphi)$ и $V_{вр}(t_1, t_2)$ являются корнями интегральных уравнений Фредгольма. Весовая функция оптимального пространственного фильтра находится в результате аналитического решения интегрального уравнения Фредгольма 2-го рода путем применения интегральных операторных преобразований [9, 10]. Ее вид определяет функция пространственной когерентности отраженного от ОЭС сигнала в плоскости наблюдения аппаратуры разведки $\Gamma_2(l_\varphi, R_\varphi, \rho_\varphi)$:

$$V_{пр}(R_\varphi, \rho_\varphi) = -\frac{2}{N_0} \cdot \frac{\Gamma_2(l_\varphi, R_\varphi, \rho_\varphi)}{2N_0 + T\Gamma_2(l_\varphi, R_\varphi, \rho_\varphi)}, \quad (5)$$

где: N_0 – односторонняя спектральная плотность мощности шума; T – интервал наблюдения.

Весовая функция оптимального временного фильтра может быть найдена в результате численного решения интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода с использованием разложения Карунена-Лозва в виде [10]:

$$V_{ep}(x_1, x_2) = \frac{P_c}{N_0^2} \sum_{n=0}^{\infty} \varphi_n(x_1) \varphi_n(x_2) \chi_n^{-1} \left(1 + \frac{P_c}{N_0 \chi_n} \right)^{-1}, \quad (6)$$

где $x_1 = t_1 / T$; $x_2 = t_2 / T$; P_c – средняя мощность полезного сигнала, определяемая по выражению (4); $\varphi_n(x)$ – собственные функции, а $\{\chi_n\}$ – соответствующая им система собственных значений интегрального уравнения:

$$\varphi(x) = \chi \int_{\pm 1} R_c(x, x_1) \varphi(x_1) dx_1. \quad (7)$$

Ее вид определяет временная корреляционная функция отраженного от ОЭС сигнала $R_c(t_1, t_2)$. Оптимальный временной фильтр (6) состоит из N каналов. В каждом из них осуществляется перемножение принимаемой реализации сигнала с опорной функцией, получаемой для априори заданной временной корреляционной функции отраженного от ОЭС сигнала. Полученные в каждом канале произведения затем суммируются. ОЭС считается обнаруженным, если сигнал на выходе ОП (логарифм функционала отношения правдоподобия (ЛФОП)) превысит заданный порог обнаружения, определяемый допустимым уровнем ложной тревоги [11].

Для нахождения вероятности правильного обнаружения отраженного от ОЭС сигнала P_D будем исходить из того, что ЛФОП на выходе ОП не нормализуется [9]. Оценки характеристик обнаружения могут быть найдены с использованием функциональной связи между характеристической функцией случайного процесса и законом его распределения [12]. Выражения для P_D и вероятности ложной тревоги P_F имеют следующий вид:

$$P_D = \int_c^{\infty} p_{s+n}(L) dL = \int_c^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Theta_{s+n}(iv) \exp(-ivL) dL dv, \quad (8)$$

$$P_F = \int_c^{\infty} p_n(L) dL = \int_c^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Theta_n(iv) \exp(-ivL) dL dv, \quad (9)$$

где: c – множитель, определяемый условиями детектирования сигнала; $\Theta_{s+n}(iv)$, $\Theta_n(iv)$ – характеристические функции распределения ЛФОП при наличии сигнала и в его отсутствии:

$$\Theta_{s+n}(iv) = (1 - iv(\lambda_k - 1))^{-1/2}, \quad \Theta_n(iv) = (1 - iv(\lambda_k - 1) / \lambda_n)^{-1/2}, \quad (10)$$

где $\lambda_k = 1 + q_0^{-1} \chi_k$, $q_0 = P_c T / N_0$ – отношение сигнал–шум на входе ОП в полосе наблюдения.

Общий вид характеристических функций распределения ЛФОП (10) позволяет использовать для оценки характеристик обнаружения ОП метод Монте-Карло [11]. Порядок его использования заключается в следующем [10, 11]. Для получения оценок P_D и P_F генерируются две независимые последовательности случайных величин, распределенных по нормальному закону. Задается объем выборки M и количество интервалов разбиения k . На основании неравенства Чебышева выбирается доверительный интервал в соответствии с выражением: $H = 9\sigma(H_0, H_1)$. В нем σ – среднеквадратичное отклонение (СКО) ЛФОП для гипотез H_0, H_1 , рассчитанное по формулам [10, 11]:

$$\sigma^2(H_1) = \sum_{k=1}^N (\lambda_k - 1)^2, \quad \sigma^2(H_0) = \sum_{k=1}^N ((\lambda_k - 1) / \lambda_k)^2.$$

Достижение равноточности оценок P_D и P_F обеспечивается путём изменения объема выборки и количества интервалов ее разбиения на величину $\Delta h = h_D / h_F$ до выполнения условия – $h_F = h_D$ (h_F , h_D – шаг разбиения при оценивании характеристик при наличии только шума и сигнала и шума, соответственно). С использованием данного подхода характеристики обнаружения определяются в виде:

$$P_D = 1 - \sum_{i=1}^{C_D} \text{Hist}D_i, \quad P_F = \sum_{i=C_F}^{k-1} \text{Hist}F_i,$$

где $\text{Hist}D$, $\text{Hist}F$ – гистограммы распределения выборки при наличии сигнала и шума, а также при наличии только шума соответственно, а

$$C_D = \text{Round}\left(\frac{c}{h_D}\right), \quad C_F = \text{Round}\left(\frac{c}{h_F}\right),$$

где $\text{Round}(-)$ – функция округления до ближайшего целого значения.

Найденные значения оценок P_D и P_F позволяют оценить статистические характеристики обнаружения ОЭС средством разведки, использующим при принятии решения об обнаружении логику « b принятых импульсов из c излученных»:

$$P_{D0} = 1 - (1 - P_D)^b, \quad P_{F0} = 1 - (1 - P_F)^b. \quad (11)$$

2.3. Частная модель поиска ОЭС

Поиск ОЭС обычно проводится, когда контролируемая средством разведки область пространства имеет большие размеры, при этом объект разведки может сам находиться в режиме поиска. Обычно рассматриваются одноэтапный, двухэтапный и комбинированный поиски [5].

Одноэтапный поиск ОЭС осуществляется лазерным локатором путем просмотра полем зрения заданной зоны. Рассмотрим общий случай, когда время нахождения объекта разведки в зоне поиска ограничено, а моменты его появления и исчезновения являются случайными. Просмотр проводится в определенной последовательности, задаваемой законом сканирования, который циклически повторяется до того момента, пока в одном из элементов не будет принято решение (правильное или ошибочное) об обнаружении ОЭС. Рассматриваемый процесс поиска может быть представлен в виде случайного процесса с дискретным множеством состояний [13], что позволяет разведдоступность ОЭС определить выражением (индекс I в нем обозначает, что данный показатель относится к одноэтапному поиску):

$$P_{PDI} = \frac{1}{m} P_1 P_{D0} \sum_{i=1}^m (1 - P_{F0})^{i-1} \sum_{n=0}^{\infty} (P_1 (1 - P_{D0}) + (1 - P_1) (1 - P_{F0}))^n \times \\ \times P_{F0}^{(m-1)n} h(t - (mn + i)T_n), \quad (12)$$

где $h(t - (mn + i)T_n) = \begin{cases} 1 & \text{при } t - (mn + i)T_n \geq 0 \\ 0 & \text{при } t - (mn + i)T_n < 0 \end{cases}$ – единичная функция.

Выражение (12) соответствует случаю поиска ОЭС на равномерном фоне, при условии равновероятного нахождения объекта разведки в каждом элементе зоны поиска. В нем m – количество элементов разрешения в зоне поиска; P_1 – вероятность ориентации ОЭС и ЛСР друг на друга во время просмотра лазерным локатором одного элемента разрешения зоны поиска; P_{D0} и P_{F0} – вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги при просмотре ЛСР одного элемента поиска (значения P_{D0} могут быть найдены с помощью вышеописанной модели ОП, при условии, что время наблюдения одного элемента зоны поиска T_n не превышает времени, отводимого на прием и анализ сигнала T_a); k – количество циклов поиска. Представляя процессы сканирования ОЭС и ЛСР в виде потоков импульсов, длительности которых τ_1 и τ_2 соответствуют продолжительностям ориентации локатора и ОЭС друг на друга, а периоды T_1 и T_2 равны периодам сканирования указанных средств определим вероятность P_1 следующим образом [13]:

$$P_1 = \int_{T_a}^{\infty} \alpha_{1,2}(\tau) d\tau, \quad \alpha_{1,2} = \tau_{1,2} \frac{d^2}{d\tau^2} \prod_{i=1}^2 \frac{1}{\tau_i} \int_{\tau}^{\infty} \int_x^{\infty} \alpha_i(s) ds,$$

где: α_1, α_2 – плотности распределений длительностей импульсов соответствующих потоков совпадений. И в случае экспоненциальных распределений α_1, α_2 получаем:

$$P_1 = \exp\left(-(1/\tau_1 + 1/\tau_2)T_n\right).$$

Математическое ожидание времени успешного завершения поиска составит [13]:

$$t_1 = \frac{1 - (m-1)(1 - P_{F0})^m + m(1 - P_{F0})^{m+1}}{P_F(1 - (1 - P_{F0})^m)} T_n k. \quad (13)$$

Двухэтапный поиск обычно проводится с целью сокращения времени поиска и повышения его надежности. Будем исходить из следующего [5]. Средство разведки, состоящее из двух средств, обладающих разными полями зрения, осуществляет циклический просмотр сектора поиска в два этапа в определенной последовательности, задаваемой законом сканирования. При этом широкопольное средство осуществляет поиск носителя ОЭС, а узкопольное собственно ОЭС. На первом этапе широкопольное средство разведки просматривает сектор, обладающий угловым размером W и состоящий из m элементов разрешения. После обнаружения цели на первом этапе узкопольное средство выполняет допоиск ОЭС (второй этап поиска) по дополнительным информационным признакам, появляющимся и исчезающим в случайные моменты времени. Дописк осуществляется в пределах зоны неопределенности w , состоящей из n элементов разрешения. На первом этапе каждый элемент разрешения наблюдается в течение промежутка времени t_1 , на втором – t_2 , которые в общем случае могут быть случайными. Считается, что решение о завершении поиска принимается при обнаружении цели (правильном или ошибочном) на втором этапе. С учетом данных допущений, выражение для вероятности успешного завершения поиска ОЭС за заданное время имеет вид [14]:

$$P_{PDII} = \frac{1}{mn} P_0 P_a P_{D01} P_{D02} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n \sum_{u=0}^M \sum_{v=0}^N (1-P_{D01})^u A^v (1-P_{F01})^{(m-1)u+i-1} \times \\ \times (1-P_{F02})^{(n-1)v+k-1} h(t - (mu+i)\tau_1 - (nv+k)\tau_2), \quad (14)$$

где: $A = 1 - P_0 P_a P_{D02} - (1 - P_0) P_{F02}$ – вероятность события, заключающегося в том, что на втором этапе при просмотре элемента, в котором находится ОЭС, не произойдет ни правильного обнаружения, ни ложной тревоги; $P_{D01(2)}$ и $P_{F01(2)}$ – вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги для первого (второго) средства разведки; P_a – вероятность того, что ЛСР хватит времени обнаружить ОЭС при просмотре элемента поиска;

$$a_0 = (1 - P_{D01})(1 - P_{F01})^{m-1}, \quad b_1 = A(1 - P_{F02})^{n-1}.$$

Представляя процессы взаимного сканирования ОЭС и ЛСР в виде двух потоков импульсов, длительности которых τ_1 и τ_2 соответствуют продолжительности ориентации ЛСР и ОЭС друг на друга, а периоды T_1 и T_2 равны периодам сканирования указанных средств, вероятности P_0 и P_a при экспоненциальном распределении длительностей импульсов определяются как [14]:

$$P_0 = \frac{1}{T_2}, \quad P_a = \exp\left(-\left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}\right)T_a\right).$$

Математическое ожидание времени успешного завершения двухэтапного поиска определяется из выражения [14]:

$$t_{II} = \tau_1 \left(\frac{a_3 + (Ma_3 - M - 1)a_3^{M+1}}{(1-a_3)(1-a_3^{M+1})} + \frac{m+1}{2} \right) + \tau_2 \left(n \frac{b_3 + (Nb_3 - N - 1)b_3^{N+1}}{(1-b_3)(1-b_3^{N+1})} + \frac{n+1}{2} \right), \quad (15)$$

где: M и N – максимальное количество циклов поиска на первом и втором этапах соответственно; коэффициенты a_3 , b_3 определяются исходя из выражений:

$$a_3 = (1 - P_{D0})(1 - P_{F0})^{m-1}, \quad b_3 = \left(1 - P_1 P_{D0} \exp\left(-\frac{T_a}{\tau_1} - \frac{T_a}{\tau_2}\right) - (1 - P_1) P_{F0} \right) (1 - P_{F0})^{n-1}.$$

Комбинированный поиск проводится системами разведки, состоящими из трех и более средств. В частном случае такая система может состоять из двух средств с широким мгновенным полем зрения и одного с узким полем зрения. Осуществляется двухэтапный поиск целей: на первом этапе поиск производится средствами разведки с широким полем зрения, а на втором этапе осуществляется поиск узкопольным средством. На первом этапе решение об обнаружении цели принимается с логикой «и», либо с логикой «или». Это позволяет одновременно достичь высокой достоверности принимаемых решений и сократить время поиска. Рассмотрим случай, когда решение об обнаружении цели принимается в соответствии с логикой «или». В данном случае вероятность обнаружения определяется как вероятность выполнения хотя бы одного из двух событий: «произошло обнаружение цели в первом (втором) канале», т.е.:

$$P_{PI}^{K1} = P_{DI}(t) + P_{DII}(t) - P_{DI}(t)P_{DII}(t), \quad (16)$$

где $P_{DI}(t)$, $P_{DII}(t)$ – вероятности обнаружения цели к моменту времени t соответственно первым и вторым каналами, определяются исходя из выражений [15]:

$$P_{DI}(t) = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n \sum_{u=0}^{\infty} \sum_{v=0}^{\infty} P_{li} P_{2k} P_{D01i} P_{D02k} \prod_{j=1}^{i-1} (1 - P_{F01j}) \prod_{\ell=1}^{k-1} (1 - P_{F02\ell}) \times a_0^u \cdot b_{li}^v h(t - (mu + i)\tau_1 - (nv + k)\tau_2), \quad (17)$$

$$P_{DII}(t) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{\ell} \sum_{u=0}^{\infty} \sum_{w=0}^{\infty} P_{li} P_{3j} P_{D01i} P_{D03j} \prod_{\Theta=1}^{i-1} (1 - P_{F01\Theta}) \prod_{\varepsilon=1}^{j-1} (1 - P_{F03\varepsilon}) \times a_0^u \cdot b_{li}^w h(t - (mu + i)\tau_1 - (\ell w + j)\tau_3), \quad (18)$$

где P_{li} (P_{2k} , P_{3j}) – вероятность ориентации ОЭС и первого (второго, третьего) средства разведки друг на друга во время просмотра лазерным локатором i -го (k -, j -го) элемента разрешения зоны поиска; P_{D01i} , P_{F01i} , P_{D02k} , P_{F02k} , P_{D03j} , P_{F03j} – вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги при обнаружении цели в i -том, k -том и j -том элементах разрешения секторов поиска первым, вторым, третьим средством; m , n , ℓ – количество элементов разрешения в секторах поиска первого, второго и третьего средства; τ_1 , τ_2 и τ_3 – время просмотра одного элемента разрешения первым, вторым, третьим средством соответственно; коэффициенты a_0 , b_{li} , b_{li} определяются исходя из выражений:

$$a_0 = \sum_{s=1}^m P_{ls} (1 - P_{D01s}) \prod_{\substack{q=1 \\ q \neq s}}^m (1 - P_{D01q}), \quad b_{li} = \sum_{kk=1}^n P_{2kk} (1 - P_{D02kk}) \prod_{\substack{\ell=1 \\ \ell \neq k}}^n (1 - P_{F02\ell}),$$

$$b_{li} = \sum_{jj=1}^{\ell} P_{3jj} (1 - P_{D03jj}) \prod_{\substack{\Theta=1 \\ \Theta \neq j}}^{\ell} (1 - P_{F03\Theta}).$$

Математическое ожидание времени успешного завершения комбинированного поиска при равных значениях вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги для всех средств, используемых при поиске, в этом случае определяется исходя из выражения [15]:

$$t_{K1} = \frac{1}{P_{PD}} \left(\frac{P_{D01} P_{D02}}{mn} a_3 (1 - b_4) + \frac{P_{D01} P_{D03}}{ml} b_3 (1 - a_4) \right), \quad (19)$$

где коэффициенты a_3 , a_4 , b_3 , b_4 определяются исходя из выражений:

$$a_3 = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n \sum_{u=1}^M \sum_{v=1}^N \left(\left(1 - \frac{P_{D01}}{m} \right)^u (1 - P_{F01})^{(m-1)u+i-1} \left(1 - \frac{P_{D01}}{m} \right)^v \times \right.$$

$$\left. \times (1 - P_{F01})^{(n-1)v+k-1} \left(\frac{mu + i}{\tau_1^{-1}} + \frac{nv + k}{\tau_2^{-1}} \right) \right),$$

$$a_4 = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n \sum_{u=1}^M \sum_{v=1}^N \left(\left(1 - \frac{P_{D03}}{m} \right)^u (1 - P_{F03})^{(m-1)u+i-1} \left(1 - \frac{P_{D03}}{m} \right)^v (1 - P_{F03})^{(n-1)v+k-1} \right),$$

$$b_3 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{\ell} \sum_{u=1}^M \sum_{w=1}^N \left(\left(1 - \frac{P_{D01}}{m} \right)^u (1 - P_{F01})^{(m-1)u+i-1} \left(1 - \frac{P_{D01}}{m} \right)^w \times \right.$$

$$\left. \times (1 - P_{F01})^{(\ell-1)w+j-1} \left(\frac{mu + i}{\tau_1^{-1}} + \frac{lw + j}{\tau_2^{-1}} \right) \right),$$

$$b_4 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^l \sum_{u=1}^M \sum_{w=1}^N \left(\left(1 - \frac{P_{D02}}{m} \right)^u (1 - P_{F02})^{(m-1)u+i-1} \left(1 - \frac{P_{D02}}{m} \right)^w (1 - P_{F02})^{(l-1)w+j-1} \right).$$

В случае, когда решение об обнаружении цели принимается в соответствии с логикой «и», показатель $P_{PD}^{K2}(t)$ определяется следующим образом:

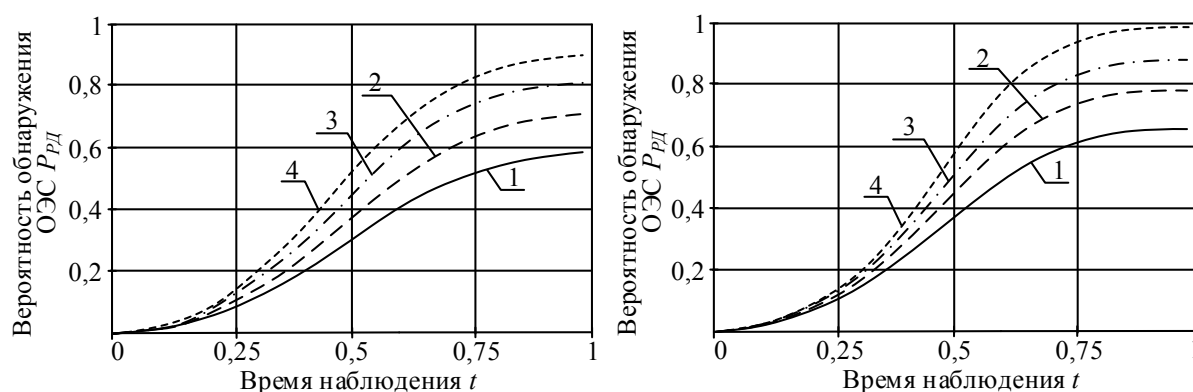
$$P_{PD}^{K2}(t) = P_{DI}(t)P_{DII}(t), \quad (20)$$

где $P_{DI}(t)$, $P_{DII}(t)$ определяются выражениями (17 и 18).

Математическое ожидание времени успешного завершения комбинированного поиска при равных значениях вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги для всех средств, используемых при поиске, в этом случае определяется исходя из выражения [15]:

$$t_{K2} = \frac{1}{P_{PD}^{K2}} \left(\frac{P_{D01}P_{D02}}{mn} a_3 b_4 + \frac{P_{D01}P_{D03}}{ml} b_3 a_4 \right). \quad (21)$$

С использованием разработанной модели ОЭС как объекта разведки проведены расчеты показателя разведдоступности ОЭС для ЛСР с комбинированным поиском в зависимости от характеристик входящих в его состав средств. Полученные зависимости для различных значений вероятностей правильного обнаружения P_{Di} и ложной тревоги P_{Fi} в одном элементе сектора поиска, числа элементов m , n , l и используемых при принятии решения об обнаружении ОЭС и завершении поиска логик («и», «или») представлены на рис. 4. Расчеты проводились на момент времени t , равный интервалу времени, необходимому для завершения поиска. Обозначения кривых на рис. 4 соответствуют условиям: 1, 3 – $P_{D1} = P_{D2} = P_{D3} = 0,7$; 2, 4 – $P_{D1} = P_{D2} = P_{D3} = 0,9$; 1, 2 – $P_{F1} = 0,0001$; 3, 4 – $P_{F1} = 0,001$.



а) принятие решения с логикой «или» б) принятие решения с логикой «и»

Рис. 4. Зависимость разведдоступности ОЭС для ЛСР, осуществляющих комбинированный поиск, от параметров их средств

Из представленных графиков следует, что при выбранных исходных данных наиболее высокая вероятность обнаружения ОЭС к заданному моменту времени t реализуется средствами разведки, осуществляющими комбинированный поиск, при принятии решения о наличии цели на первом этапе поиска с логикой «или». При принятии решения с логикой «и» ОЭС может быть уверенно

обнаружено за минимальное время лишь в том случае, когда оно находится в начале сектора поиска.

Данный результат свидетельствует о том, что для обеспечения высокой скрытности ОЭС целесообразно проводить сбалансированные по эффективности и затратам мероприятия, направленные на снижение разведдоступности как ОЭС, так и их носителей.

3. Выводы

Таким образом, на основе рассмотрения системы ОЭС-ЛСР как совокупности целостного множества составляющих их элементов, разработана модель ОЭС как объекта разведки. Она включает частные модели отраженного от ОЭС сигнала, его оптимального приемника, а также поиска ОЭС. В первой частной модели на основе фазового приближения обобщенного метода Гюйгенса-Кирхгофа формализована функция когерентности отраженного от ОЭС сигнала, принимаемого лазерным локатором разведки в случайно-неоднородной среде. На основе данной функции в частной модели оптимального приемника локатора формализована его передаточная функция, с использованием которой рассчитываются статистические характеристики обнаружения ОЭС, используемые в частной модели поиска для оценки его эффективности. В качестве показателя последней в ней формализована вероятность успешного завершения поиска за заданное время для систем разведки, осуществляющих одноэтапный, двухэтапный и комбинированный виды поиска. Это позволяет провести исследования разведдоступности ОЭС и определить его параметры, минимизирующие данный показатель.

Основным элементом новизны представленного решения является учет основных внутрисистемных и внешнесистемных связей системы «оптико-электронное средство – лазерное средство разведки», позволяющих проводить исследования показателей скрытности ОЭС в зависимости от собственных параметров, основных параметров ЛСР и условий их функционирования. Это представляет возможность количественно оценить вклад технических параметров конфликтующих сторон на показатели скрытности ОЭС и, как следствие, корректно обосновывать их значения и режимы работы.

Наиболее близкой работой по исследованию влияния характеристик ОЭС, ЛСР и условий их функционирования на скрытность ОЭС в ходе конфликтного взаимодействия с ЛСР является [3]. Однако использованная в ней модель не позволяет учитывать основные внутрисистемные и внешнесистемные связи системы «ОЭС – ЛСР» при оценке эффективности скрытного функционирования ОЭС.

Литература

1. Чурыбкин Н. Н., Евдокимов П. А. Оружие будущего сегодня // Наука и военная безопасность. 2017. № 2 (9). С. 24-28.
2. Абрамов П. И., Кузнецов Е. В., Скворцов Л. А. Перспективы применения квантово-каскадных лазеров в системах оптико-электронного противодействия. Обзор // Оптический журнал. 2017. № 5. С. 56-70.

3. Козирацкий Ю. Л., Гревцев А. И., Донцов А. А., Иванцов А. В., Козирацкий А. Ю., Кулешов П. Е., Кусакин О. В., Паринов М. Л., Прохоров Д. В. Обнаружение и координатометрия оптико-электронных средств, оценка параметров их сигналов. Монография / под ред. Ю.Л. Козирацкого. – М.: Радиотехника, 2015. – 456 с.
4. Глушков А. Н., Дробышевский Н. В., Кулешов П. Е., Алабовский А. В. Системный подход к оценке разведдоступности оптико-электронных средств // Радиотехника. 2017. № 9. С. 50-54.
5. Козирацкий Ю. Л., Донцов А. А., Иванцов А. В., Козирацкий А. Ю., Кусакин О. В., Куцев С. С., Лысиков В. Ф., Мазилев С. Л., Паринов М. Л., Прохоров Д. В. Модели пространственного и частотного поиска. Монография / под ред. Ю. Л. Козирацкого. – М.: Радиотехника, 2014. – 344 с.
6. Козинцев В. И., Белов М. Л., Орлов В. М., Городничев В. А., Стрелков Б. В. Основы импульсной лазерной локации / под ред. В. Н. Рождествина. – М.: МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2006. – 512 с.
7. Зуев В. Е., Банах В. А., Покасов В. В. Оптика турбулентной атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 271 с.
8. Глушков А. Н., Кравцов Р. Н., Митрофанов А. Л. Модель локационного наблюдения ОЭС // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2006. № 7. С. 23-27.
9. Глушков А. Н., Кравцов Р. Н., Митрофанов А. Л. Численный синтез и анализ оптимального обнаружителя // Теория и техника радиосвязи. 2004. № 1. С. 84-96.
10. Глушков А. Н., Кравцов Р. Н., Митрофанов А. Л. Об одном подходе к численному решению интегральных уравнений Фредгольма в задачах синтеза информационных систем // Теория и техника радиосвязи. 2005. № 2. С. 7-15.
11. Глушков А. Н., Кравцов Р. Н., Митрофанов А. Л. Алгоритм обнаружения оптико-электронных средств в случайно-неоднородной среде // Теория и техника радиосвязи. 2011. № 1. С. 29-36.
12. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Советское радио, 1989. – 659 с.
13. Глушков А. Н., Козирацкий Ю. Л., Лысиков В. Ф. Динамические показатели поиска ОЭС // Радио и волоконно-оптическая связь, локация и навигация: сборник докладов Всероссийской конференции (Воронеж). – Воронеж, 1997. – С. 1531-1542.
14. Глушков А. Н., Козирацкий Ю. Л., Лысиков В. Ф. Математическая модель двухэтапного поиска случайно появляющихся целей // Радиотехника. 1999. № 6. С. 4-9.
15. Глушков А. Н., Козирацкий Ю. Л., Лысиков В. Ф., Тюрин Г. Л. Показатели эффективности комплексированной системы разведки на этапе поиска и обнаружения // Радиотехника. 2000. № 8. С. 12-16.

References

1. Churybkin N. N., Evdokimov P. A. Oruzhie budushego segodnya [Weapons of the future today]. *Nauka i voennaya bezopasnost'*, 2017, no. 2 (9), pp. 24-28 (in Russian).
2. Abramov P. I., Kuznecov E. V., Skvortsov L. A. Perspektivy primeneniya kvantovo-kaskadnykh lazerov v sistemakh optiko-elektronnoy protivodeystviya. Obzor [Prospects of application of quantum-cascade lasers in systems of electro-optical interference. Overview]. *Journal of Optical Technology*, 2017, no. 5, pp. 56-70 (in Russian).
3. Kozirackij Yu. L., Grevcev A. I., Doncov A. A., Ivancov A. V., Kozirackij A. Yu., Kuleshov P. E., Kusakin O. V., Parinov M. L., Prohorov D. V. *Obnaruzhenie i koordinatometriya optiko-elektronnykh sredstv, ocenka parametrov ih signalov. Monografiya* [Detection and coordinatedly optical-electronic means, estimation of parameters of their signals. Monography]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2015. 456 p. (in Russian).
4. Glushkov A. N., Drobyshevskij N. V., Kuleshov P. E., Alabovskij A. V. Sistemnyj podhod k ocenke razveddostupnosti optiko-elektronnykh sredstv [A systematic approach to the assessment of accessibility of reconnaissance of optical-electronic means]. *Radiotekhnika*, 2017, no. 9, pp. 50-54 (in Russian).
5. Kozirackij Yu. L., Doncov A. A., Ivancov A. V., Kozirackij A. Yu., Kusakin O. V., Kushchev S. S., Lysikov V. F., Mazilov S. L., Parinov M. L., Prohorov D. V. *Modeli prostranstvennogo i chastotnogo poiska. Monografiya* [Models of spatial and frequency search. Monography]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014. 344 p. (in Russian).
6. Kozincev V. I., Belov M. L., Orlov V. M., Gorodnichev V. A., Strelkov B. V. Eds. Rozhdestvina V. N. *Osnovy impul'snoj lazernoj lokacii* [Basics of pulsed laser location]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2006. 512 p. (in Russian).
7. Zuev V. E., Banah V. A., Pokasov V. V. *Optika turbulentnoj atmosfery* [Optics of a turbulent atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988. 271 p. (in Russian).
8. Glushkov A. N., Kravcov R. N., Mitrofanov A. L. Model' lokacionnogo nablyudeniya OES [Model of OEM location surveillance]. *Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayushie sistemy*, 2006, no. 7, pp. 23-27 (in Russian).
9. Glushkov A. N., Kravcov R. N., Mitrofanov A. L. Chislennyj sintez i analiz optimal'nogo obnaruzhitelya [Numerical synthesis and analysis of the optimal detector]. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*, 2004, no. 1, pp. 84-96 (in Russian).
10. Glushkov A. N., Kravcov R. N., Mitrofanov A. L. Ob odnom podhode k chislennomu resheniyu integral'nykh uravnenij Fredgol'ma v zadachah sinteza informacionnykh system [On an approach to the numerical solution of Fredholm integral equations in problems of information systems synthesis]. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*, 2005, no. 2, pp. 7-15 (in Russian).
11. Glushkov A. N., Kravcov R. N., Mitrofanov A. L. Algoritmy obnaruzheniya optiko-elektronnykh sredstv v sluchajno-neodnorodnoy srede [Algorithms for the

detection of optical-electronic means in a randomly inhomogeneous medium]. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*, 2011, no. 1, pp. 29-36 (in Russian).

12. Levin B. R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki* [Theoretical foundations of statistical radio engineering]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1989. 659 p. (in Russian).

13. Glushkov A. N., Kozirackij Yu. L., Lysikov V. F. Dinamicheskie pokazateli poiska OES [Dynamic OEM search indicators]. *Radio i volokonno-opticheskaya svyaz', lokaciya i navigaciya: Vserossiiskaia konferentsiia: sbornik dokladov* [Radio and fiber-optic communication, location and navigation. Collection of reports of the All-Russian Conference]. Voronezh, 1997, pp. 1531-1542 (in Russian).

14. Glushkov A. N., Kozirackij Yu. L., Lysikov V. F. Matematicheskaya model' dvuhetapnogo poiska sluchajno poyavlyayushchihsiya celej [Mathematical model of two-stage search for randomly appearing targets]. *Radiotekhnika*, 1999, no. 6, pp. 4-9 (in Russian).

15. Glushkov A. N., Kozirackij Yu. L., Lysikov V. F., Tyurin G. L. Pokazateli effektivnosti kompleksirovannoj sistemy razvedki na etape poiska i obnaruzheniya [Performance indicators of the integrated intelligence system at the stage of search and detection]. *Radiotekhnika*, 2000, no. 8, pp. 12-16 (in Russian).

Статья поступила 22 февраля 2019 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

Дробышевский Николай Васильевич – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адъюнкт. 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: d_n.v@mail.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 Optical-Electronic Means as an Object of Intelligence

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

Statement of the problem. The development of laser weapons complexes actualizes the need to protect optical-electronic means from them. Hiding the object of protection from the intelligence subsystems of such complexes is one of the effective ways to counter. This determines the need for research on the availability of optical-electronic means to identify ways to reduce it. **Purpose of the work** is to develop a model that allows you to determine the effect of the parameters of optical-electronic means, laser means of intelligence and the conditions of their operation on the secrecy of optical-electronic means from laser means of intelligence. **The novelty of the work.** The model developed by us takes into account the basic intrasystem and external system communications of the system "optical-electronic means - laser means of intelligence" and allows to conduct studies of the indicators of the secrecy of optical-electronic means depending on its own parameters, main parameters of the laser means of intelligence and conditions of their functioning. **Result.** We considered the system "optical-electronic means - laser means of intelligence" as a set of a whole set of their constituent elements and developed a model of optical-electronic means as an object of intelligence, which includes particular models of the signal reflected from the optical-electronic means, its optimal receiver, and also search optical-electronic means. **Practical relevance.** The established laws allow us to quantify the contribution of the technical parameters of the conflicting parties to the indicators of the secrecy of optical-electronic means and, as a result, correctly justify their values and modes of operation.

Key words: model, stealth operation, optical-electronic means, laser means of intelligence, intelligence accessibility, types of search.

Information about Authors

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

Nikolaj Vasil'evich Drobyshevskij – Doctoral Student. The postgraduate student. Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh). Field of research: information conflict for optical-electronic systems. E-mail: d_n.v@mail.ru

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

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