

УДК 623.624.2

Системный подход к обеспечению требуемой разведзащищенности оптико-электронных средств

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

Постановка задачи: обеспечение скрытности функционирования оптико-электронных средств в условиях их работы в зоне обнаружения средств разведки конфликтующей стороны осложняется тем, что параметры объектов защиты неодинаково влияют на их эффективность и скрытность. Исходя из этого, необходимо определить параметры оптико-электронных средств, снижающие эффективность работы средств разведки при обеспечении требуемой эффективности функционирования самих оптических устройств. **Целью работы** является разработка системного подхода к обеспечению требуемой разведзащищенности оптико-электронных средств и проведение анализа влияния основных параметров средств – участников конфликта на характеристики выигрыша в нем. **Новизна работы** заключается в системном рассмотрении конфликта «оптико-электронное средство – лазерное средство разведки» на различных этапах функционирования сторон, что позволяет определять параметры оптико-электронных средств, снижающие эффективность работы средств разведки при обеспечении требуемой эффективности функционирования оптико-электронных средств. **Результат:** разработан системный подход к обеспечению требуемой разведзащищенности оптико-электронных средств на основе комплексного анализа влияния основных параметров лазерных локаторов разведки и защищаемых объектов на эффективность решения выполняемых средствами задач. **Практическая значимость:** полученные зависимости позволяют количественно оценить вклад технических параметров конфликтующих сторон на характеристики выигрыша в конфликте и, как следствие, более корректно обосновывать их параметры и режимы работы.

Ключевые слова: разведзащищенность, оптико-электронное средство, лазерное средство разведки, функциональное поражение, информативность изображения.

Введение

В современных условиях функционирование оптико-электронных средств (ОЭС), выполняющих задачу по получению разведывательных данных, протекает, как правило, в условиях конфликта с другими средствами. Он заключается в том, что ОЭС стремятся получить как можно больше информации об объектах противостоящей стороны, которая препятствует ей в этом. Одним из путей достижения выигрыша в конфликте является скрытие собственных намерений и упреждающее выявление действий противостоящей стороны для их блокирования с помощью специальных способов и средств [1]. Скрытие собственных намерений обычно осуществляют путем повышения разведзащищенности (РЗ) [2] защищаемого объ-

Библиографическая ссылка на статью:

Глушков А. Н., Кулешов П. Е., Дробышевский Н. В., Марченко А. В. Системный подход к обеспечению требуемой разведзащищенности оптико-электронных средств // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 92-109. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/05-Glushkov.pdf>

Reference for citation:

Glushkov A. N., Kuleshov P. E., Drobyshevskij N. V., Marchenko A. V. A system approach to ensuring the required intelligence protection of optical-electronic means. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 4, pp. 92-109. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/05-Glushkov.pdf> (in Russian).

екта, под которой понимается способность объекта защиты в процессе конфликтного взаимодействия с техническими средствами разведки сохранять в тайне сведения о себе. РЗ ОЭС характеризуется совокупностью излучательных и отражательных характеристик, требования к значениям которых естественно предъявлять с учетом возможностей средств разведки. Повышение РЗ ОЭС осложняется тем, что параметры объекта защиты контрпродуктивно влияют на эффективность и РЗ ОЭС. Например, при увеличении поля зрения оптического прибора возрастает контролируемая им область пространства, но при этом возрастают возможности систем разведки по обнаружению ОЭС. Поэтому задачу обеспечения требуемой РЗ ОЭС целесообразно ставить как задачу определения параметров ОЭС, затрудняющих эффективную работу средств разведки при обеспечении требуемой эффективности функционирования самого ОЭС. Несмотря на значительное количество публикаций, посвященных разработке ОЭС, обширная библиография по которым содержится, например, в [3], задача обеспечения их требуемой РЗ пока не получила законченного решения. Главным образом, это связано с отсутствием методического аппарата, связывающего параметры ОЭС и лазерных средств разведки (ЛСР) с эффективностью функционирования сторон и РЗ ОЭС. Для разработки такого аппарата естественно использовать системный подход [4], который дает возможность представить систему ОЭС–ЛСР как совокупность целостного множества составляющих их элементов, взаимодействующих через окружающую среду. Это позволяет определить влияние их параметров на показатели эффективности функционирования каждой из конфликтующих сторон.

Системный подход к обеспечению требуемой разведзащищенности оптико-электронных средств

Математическая формализация задачи имеет следующий вид. Дано:

- тип ОЭС, использующего множество способов защиты от ЛСР Ξ_x , характеризуемых вектором $\vec{X} \in \Xi_x$;
- тип ЛСР, использующего множество способов определения характеристик разведываемого объекта Θ_y , характеризуемых вектором $\vec{Y} \in \Theta_y$;
- оптико-метеорологические и геометрические условия функционирования, характеризуемые вектором параметров среды $\vec{g}_{cp} \in V_{cp}$.

Для заданных типов ОЭС, ЛСР и параметров среды требуется определить значение целевой функции, для таких параметров ОЭС, при которых обеспечиваются максимальное значение разведзащищенности, в качестве показателя которой используется вероятность выигрыша ОЭС $P(\vec{X}, \vec{Y}, \vec{g}_{cp})$ в информационном конфликте с ЛСР, и требуемое значение эффективности ОЭС $I(\vec{X}, \vec{g}_{cp})$:

$$\begin{aligned} \vec{Z} &= \arg_{\vec{X} \in \Xi_x} \max P(\vec{X}, \vec{Y}, \vec{g}_{cp}); \\ I(\vec{X}, \vec{g}_{cp}) &\geq I_T; \end{aligned} \tag{1}$$

где I_T – требуемая эффективность ОЭС.

Оптимизируемыми параметрами ОЭС являются площадь приемной апертуры, фокусное расстояние объектива, коэффициент отражения приемника, траектория и скорость сканирования, которые связаны с такими параметрами ЛСР как длина волны излучения, мощность зондирующего сигнала, радиус пространственной когерентности зондирующего излучения, радиус излучающей апертуры, траектория и скорость сканирования.

В качестве показателя эффективности ОЭС целесообразно использовать информативность сформированного изображения наблюдаемой сцены, рассчитываемую в битах по формуле [5]:

$$H = 0,67\pi \left(\frac{R}{\lambda} \beta \right)^2 \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{ш}} \right), \quad (2)$$

где R – радиус приемной апертуры ОЭС; λ – длина волны излучения; 2β – поле зрения оптической системы; P_c – мощность сигнала; $P_{ш}$ – мощность шума.

ОЭС ведет разведку путем последовательного просмотра пространства в заданном секторе обзора, который защищается лазерным комплексом функционального поражения (ЛКФП) [6] от съема информации. Такие комплексы представляют собой сложные образцы вооружения, включающие в свой состав подсистему разведки, подсистему наведения, подсистему создания поражающих помех и подсистему управления. Разведка объектов поражения обычно осуществляется по данным внешнего целеуказания с помощью ЛСР, работающих на основе эффекта бликовой локации [7]. На начальном этапе конфликта возможности противника по разведке ОЭС характеризуются разведдоступностью [8], которая определяется как совокупность свойств ОЭС, определяющих реализацию возможностей технической разведки по получению данных об излучательных и отражательных характеристиках. В процессе функционирования ОЭС принимает меры по своему скрытию, эффективность которых характеризует РЗ. ЛСР обнаруживает ОЭС с помощью одного или нескольких датчиков. При этом могут быть реализованы одноэтапный, двухэтапный или комбинированный виды поиска [9].

Одноэтапный поиск ОЭС осуществляется лазерным локатором путем просмотра полем зрения заданной зоны. Просмотр проводится в определенной последовательности, задаваемой законом сканирования, который циклически повторяется до того момента, пока не будет принято решение об обнаружении ОЭС. При двухэтапном поиске комплекс разведки, состоящий из двух датчиков, обладающих разными полями зрения, осуществляет циклический просмотр сектора поиска в два этапа. После обнаружения носителя ОЭС на первом этапе широкопольным средством, узкопольное средство выполняет допоиск ОЭС. Решение о завершении поиска принимается при обнаружении ОЭС на втором этапе. Комбинированный поиск проводится системами разведки, состоящими из трех и более средств, и осуществляется в два этапа. На первом этапе поиск производится средством разведки с широким полем зрения, а на втором этапе осуществляется поиск узкопольными средствами. Решение об обнаружении цели может приниматься с логикой «ИЛИ», либо с логикой «И». В дальнейшем нами будет рассмотрен первый вариант, как наиболее распространенный на практике.

Для исследования разведзащищенности ОЭС разработана динамическая модель процесса защиты ОЭС от ЛСР. Она описывает конфликт двух сторон: сторона O представляет ОЭС, целевая функция которой состоит в получении координатной и некоординатной информации об объектах стороны B , при этом ОЭС состоит из подсистемы разведки, подсистемы защиты от разведки лазерным комплексом и подсистемы управления. Сторона B располагает для защиты от съема информации ЛКФП, выполняющего разведку объектов поражения с помощью ЛСР.

Граф, отражающий динамику конфликта ОЭС–ЛСР, представлен на рис. 1. Вершины графа расположены в соответствии с последовательностью функционирования сторон, дуги графа ориентированы по направлению протекания процесса. Предполагается, что одновременно не может произойти более одного изменения состояний сторон. Переходы из состояния в состояние, обозначенные на графе пунктирными линиями, являются условными, так как зависят от выполнения этапов процесса функционирования противостоящей стороны.

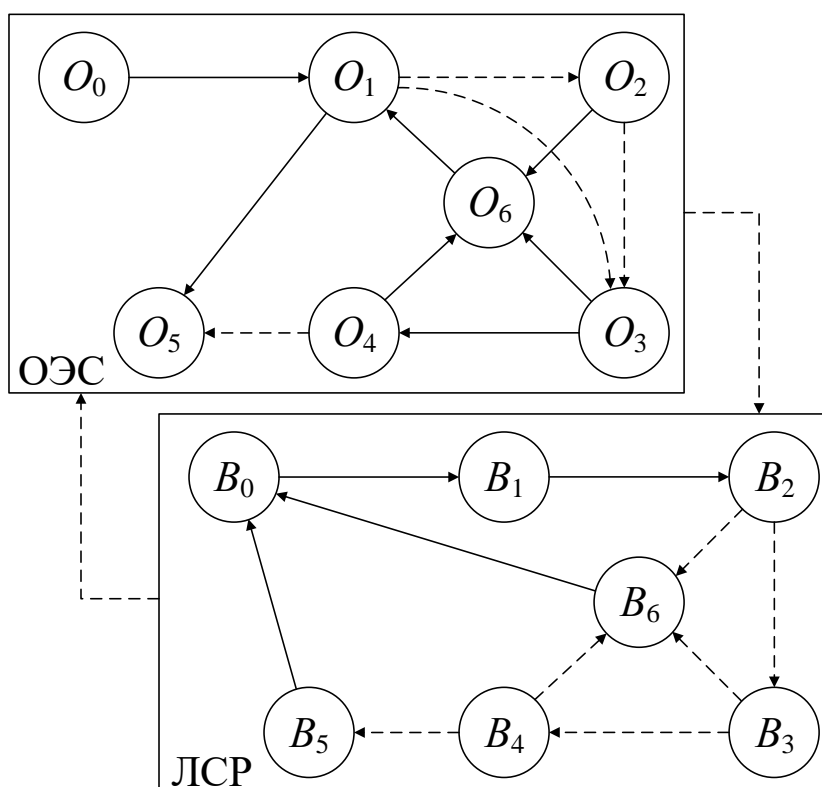


Рис. 1. Граф состояний сторон конфликта ОЭС–ЛСР

В разработанном графе введены следующие состояния:

- O_0 – основной режим работы (съем информации);
- O_1 – мониторинг противника (прием зондирующего излучения ЛСР);
- O_2 – режим защиты от оптического контакта с ЛСР;
- O_3 – режим защиты от обнаружения ЛСР;
- O_4 – режим защиты от распознавания ЛСР;
- O_5 – проигрыш в конфликте;
- O_6 – выигрыш в конфликте (успешная защита от разведки лазерным комплексом);

- B_0 – ожидание внешнего целеуказания;
- B_1 – отработка целеуказания (ориентация на ОЭС);
- B_2 – поиск ОЭС (прием отраженного от объекта сигнала);
- B_3 – обнаружение ОЭС (прием m отраженных от объекта импульсов из n излученных);
- B_4 – распознавание ОЭС;
- B_5 – поражение в конфликте (пропуск цели);
- B_6 – выигрыш в конфликте (выдача в подсистему управления информации об ОЭС).

ОЭС в исходном состоянии O_0 производит съем информации, при этом подсистема защиты от разведки лазерным комплексом находится в состоянии ожидания команды на включение режимов защиты. ЛСР в исходном состоянии B_0 находится в режиме ожидания внешнего целеуказания (например, от радиолокационной станции), после поступления которого исполнительными механизмами наведения ЛСР начинается его отработка – состояние B_1 , по окончании которой ЛСР ориентируется в направлении на ОЭС с ошибкой, определяемой точностью целеуказания. Затем ЛСР переходит в состояние B_2 , в котором в поле ошибок внешнего целеуказания осуществляет просмотр пространства до получения отраженного от объекта сигнала. После его получения ЛСР переходит в режим обнаружения ОЭС – состояние B_3 . Решение о наличии ОЭС принимается в соответствии с логикой: обнаружение не менее m отраженных от объекта импульсов из n излученных.

При нахождении ОЭС в зоне возможного воздействия противника одновременно с реализацией основной целевой функции производится мониторинг противника – состояние O_1 . Это позволяет после перехода ЛСР в состояние B_2 , обнаружить его функционирование по рассеянному атмосферой или прямому излучению. При обнаружении рассеянного излучения, подсистема управления ОЭС выдает команду в подсистему защиты на включение режима защиты от оптического контакта с ЛСР, например, путем установления соответствующего закона сканирования – состояние O_2 . Если оптический контакт между ЛСР и ОЭС состоялся, в последнем включается режим защиты от обнаружения противником, например, путем смещения матрицы фотоприемников из плоскости наблюдения (расфокусировка принимаемого излучения) – состояние O_3 . При обнаружении прямого излучения лазерного локатора, в ОЭС включается режим защиты от обнаружения.

После обнаружения ОЭС в лазерном средстве разведки осуществляется его распознавание – состояние B_4 . Для защиты от которого в ОЭС может быть использована защита от распознавания – состояние O_4 , заключающаяся в имитации распознаваемого объекта с помощью ложной цели, например, уголкового оптического отражателя. После распознавания ОЭС лазерное средство выдает информацию о нем в подсистему управления ЛКФП – состояние B_5 . ЛКФП производит излучение поражающего импульса и контроль результатов воздействия.

При принятии решения о поражении ОЭС ЛСР переходит в состояние B_0 , а ОЭС при поражении переходит в состояние O_5 . В случаях необнаружения и нераспознавания ОЭС лазерным комплексом, ЛСР переходит в состояние B_6 –

пропуск цели. При этом считается, что ОЭС выиграло в информационном конфликте – состояние O_6 , и оно возвращается в состояние O_1 , продолжая выполнять задачу по получению разведывательных данных. ЛСР, при наличии повторного целеуказания, повторяет цикл разведки ОЭС.

В ходе конфликта каждое действие сторон приносит некоторый частный выигрыш (проигрыш) из которых складывается результирующий выигрыш (проигрыш) по завершению конфликта. На основе теории конфликта, в качестве количественной меры оценки состояний конфликта принята плотность распределения вероятностей состояния частных результирующих выигрышей к моменту времени t $B_j(t)$. Наиболее точная оценка значений $B_j(t)$ может быть выполнена с использованием аппарата теории полумарковских случайных процессов в виде [10]:

$$B_j(t) = \sum_{i=1}^n P_{ij} \int_0^t B_i(\tau) \omega_{ij}(t-\tau) d\tau, \quad (3)$$

где $B_i(\tau)$, $i=1 \dots n$ плотность вероятностей переходов в предыдущие состояния к моменту времени τ ; P_{ij} , ω_{ij} – соответственно переходная вероятность и плотность вероятности времени перехода из состояния i в j .

Характеристики состояний сторон конфликта ОЭС–ЛСР (рис. 1) сведены в таблицу 1. Вероятностные характеристики конфликта определяются вероятностями переходов из одного состояния в другое, а временные характеристики конфликта определяются средними значениями времен ожидания переходов.

Таблица 1 – Характеристики состояний сторон конфликта ОЭС–ЛСР

Состояния	Вероятностные характеристики конфликта	Временные характеристики конфликта
B_0	Вероятность нахождения ЛСР в начальном состоянии P_0^B	Среднее время выдачи команды на обнаружение ОЭС $t_{ком}^B$
B_1	Вероятность отработки целеуказания P_{omp}^B	Среднее время отработки целеуказания t_{omp}^B
B_2	Вероятность обнаружения первого отраженного сигнала $P_{обн1}^B$	Среднее время обнаружения отраженного от ОЭС сигнала $t_{обн1}^B$
B_3	Вероятность обнаружения не менее m отраженных от ОЭС сигналов из n излученных импульсов $P_{обн3}^B$	Среднее время обнаружения не менее m отраженных от ОЭС сигналов из n излученных импульсов $t_{обн3}^B$
B_4	Вероятность распознавания ОЭС $P_{расп}^B$	Среднее время распознавания ОЭС $t_{расп}^B$
B_5		Среднее время выдачи информации t_6^B
B_6		Среднее время нахождения в состоянии t_n^B
O_0	Вероятность нахождения ОЭС в начальном состоянии P_0^O	Среднее время выдачи команды на обнаружение ЛСР $t_{ком}^O$
O_1	Вероятность обнаружения ОЭС рассеянного атмосферой излучения ЛСР $P_{обнРИ}^O$	Среднее время обнаружения рассеянного атмосферой излучения ЛСР $t_{обнРИ}^O$
	Вероятность обнаружения ОЭС прямого излучения ЛСР $P_{обнПИ}^O$	Среднее время обнаружения прямого излучения ЛСР $t_{обнПИ}^O$
O_2	Вероятность защиты ОЭС от оптического контакта $P_{р3ОК}^O = 1 - P_{обн1}^B$	Среднее время нахождения в состоянии O_2 (защита от оптического контакта) $t_{р3ОК}^O$

O_3	Вероятность защиты ОЭС от обнаружения $P_{p3O}^O = 1 - P_{обн3}^B$	Среднее время нахождения в состоянии O_3 (защита от обнаружения) t_{p3O}^O
O_4	Вероятность защиты ОЭС от распознавания $P_{p3P}^O = 1 - P_{расп}^B$	Среднее время нахождения в состоянии O_4 (защита от распознавания) t_{p3P}^O
O_6		Среднее время нахождения в состоянии O_6 (выигрыш в конфликте) t_e^O

Исходя из выражения (3) и характеристик состояний из таблицы 1 для экспоненциального закона распределения времени переходов между состояниями авторами получены уравнения, описывающие вероятности наступления состояний сторон конфликта:

$$\left\{ \begin{aligned}
 &P_n(O_1, t) = P_0^O (1 - e^{-t/t_{ком}^O}); \\
 &P_n(B_1, t) = P_0^B (1 - e^{-t/t_{ком}^B}); \\
 &P_n(B_2, t) = P_n(B_1, t) P_{омп}^B (1 - e^{-t/(t_{31}^B + t_{омп}^B)}); \\
 &P_n(O_2, t) = P_n(O_1, t) P_n(B_2, t) P_{обнПИ}^O (1 - e^{-t/(t_{31}^O + t_{обнПИ}^O)}); \\
 &P_{YB}(O_2, t) = P_n(O_2, t) P_{p3OK}^O (1 - e^{-t/(t_{32}^O + t_{p3OK}^O)}); \\
 &P_n(B_3, t) = P_n(B_2, t) P_{обн1}^B (1 - P_{YB}(O_2, t)) (1 - e^{-t/(t_{32}^B + t_{обн1}^B)}); \\
 &P_n(O_3, t) = (P_n(B_3, t) + P_n(B_4, t) - P_n(B_3, t) P_n(B_4, t)) P_{обнПИИ}^O \times \\
 &\quad \times (P_n(O_1, t) (1 - e^{-t/(t_{31}^O + t_{обнПИИ}^O)}) + P_n(O_2, t) (1 - e^{-t/(t_{32}^O + t_{p3OK}^O)}) - \\
 &\quad - P_n(O_1, t) (1 - e^{-t/(t_{31}^O + t_{обнПИИ}^O)}) P_n(O_2, t) (1 - e^{-t/(t_{32}^O + t_{p3OK}^O)})); \\
 &P_{YB}(O_3, t) = P_n(O_3, t) P_{p3O}^O (1 - e^{-t/(t_{33}^O + t_{p3O}^O)}); \\
 &P_n(B_4, t) = P_n(B_3, t) P_{обн3}^B (1 - P_{YB}(O_3, t)) (1 - e^{-t/(t_{33}^B + t_{обн3}^B)}); \\
 &P_n(O_4, t) = P_n(O_3, t) P_{обнПИИ}^O (1 - e^{-t/(t_{34}^O + t_{p3P}^O)}); \\
 &P_{YB}(O_4, t) = P_n(O_4, t) P_{p3P}^O (1 - e^{-t/(t_{34}^O + t_{p3P}^O)}); \\
 &P_n(B_5, t) = P_n(B_4, t) P_{расп}^B (1 - P_{YB}(O_4, t)) (1 - e^{-t/(t_{34}^B + t_{расп}^B)}); \\
 &P_n(O_5, t) = P_n(O_1, t) (1 - P_{обнПИИ}^O - P_{обнПИ}^O + P_{обнПИИ}^O P_{обнПИ}^O) \times \\
 &\quad \times (1 - e^{-t/(t_{31}^O + t_{обнПИИ}^O)}) + P_n(O_4, t) P_n(B_5, t) (1 - e^{-t/(t_{34}^O + t_{p3P}^O)}) - \\
 &\quad - P_n(O_1, t) (1 - P_{обнПИИ}^O - P_{обнПИ}^O + P_{обнПИИ}^O P_{обнПИ}^O) (1 - e^{-t/(t_{31}^O + t_{обнПИИ}^O)}) \times \\
 &\quad \times P_n(O_4, t) P_n(B_5, t) (1 - e^{-t/(t_{34}^O + t_{p3P}^O)}); \\
 &P_n(O_6, t) = P_{YB}(O_2, t) + P_{YB}(O_3, t) + P_{YB}(O_4, t) - P_{YB}(O_2, t) P_{YB}(O_3, t) - \\
 &\quad - P_{YB}(O_2, t) P_{YB}(O_4, t) - P_{YB}(O_3, t) P_{YB}(O_4, t) + P_{YB}(O_2, t) P_{YB}(O_3, t) P_{YB}(O_4, t) \\
 &P_n(B_6, t) = P_n(B_1, t) - P_n(B_5, t); \\
 &\dots \\
 &P_n(O_1^i, t) = (P_{YB}(O_2^{i-1}, t) (1 - P_{YB}(O_3^{i-1}, t) - P_{YB}(O_4^{i-1}, t)) + P_{YB}(O_4^{i-1}, t) + \\
 &\quad + P_{YB}(O_3^{i-1}, t) (1 - P_{YB}(O_4^{i-1}, t) + P_{YB}(O_2^{i-1}, t) P_{YB}(O_4^{i-1}, t))) (1 - e^{-t/(t_{34}^O + t_e^O)}); \\
 &P_n(B_0^i, t) = P_n(B_5^{i-1}, t) (1 - e^{-t/(t_3^B + t_e^B)}) + (1 - e^{-t/(t_3^B + t_e^B)}) (P_n(B_6^{i-1}, t) - \\
 &\quad - P_n(B_5^{i-1}, t) (1 - e^{-t/(t_3^B + t_e^B)})) P_n(B_6^{i-1}, t);
 \end{aligned} \right. \quad (4)$$

где: $P_n(-, t)$ – вероятности наступления состояний ОЭС и ЛСР к моменту времени t ; $P_{VB}(-, t)$ – вероятности защиты ОЭС от ЛСР на различных этапах функционирования сторон конфликта; $P_n(-^i, t)$ – вероятности наступления состояний сторон конфликта на i -ом цикле функционирования; t_{si}^- – среднее время нахождения сторон конфликта в состояниях от 1-го до i -го.

Полученные выражения (4) с системных позиций описывают конфликтное взаимодействие ОЭС–ЛСР и совместно с выражением (2) позволяют определить влияние их параметров на эффективность функционирования каждой из конфликтующих сторон.

С использованием разработанной динамической модели проведены исследования эффективности скрытия ОЭС от ЛСР для указанных видов поиска.

Вероятность обнаружения $P_{обн1}^B$ и время обнаружения $t_{обн1}^B$ ЛСР отраженного от ОЭС сигнала для различных видов поиска определялись в соответствии с методикой, изложенной в [9]. Вероятность $P_{обн1}^B$ определялась исходя из логики – обнаружение не менее 3 отраженных от ОЭС сигналов из 5 излученных импульсов по формуле:

$$P_{обн3}^B = 10(P_{обн1}^B)^3(1 - P_{обн1}^B)^2 + 5(P_{обн1}^B)^4(1 - P_{обн1}^B) + (P_{обн1}^B)^5. \quad (5)$$

Вероятность обнаружения ОЭС рассеянного атмосферой излучения ЛСР определялась по методикам, изложенным в [8, 11]. Вероятности P_0^B , $P_{отр}^B$, P_0^O , $P_{обнIII}^O$ приняты равными 1, а $P_{расн}^B = 0,9$. Временные характеристики конфликта задавались следующими соотношениями: $t_{отр}^B = 2 \text{ с}$; $t_{ком}^B = t_e^B = t_n^B = t_{ком}^O = t_e^O = 0,001t_{отр}^B$; $t_{обн3}^B = 4t_{обн1}^B$; $t_{расн}^B = t_{обн3}^B$; $t_{обнPI}^O = t_{отр}^B + 0,1t_{обн1}^B$; $t_{обнIII}^O = t_{отр}^B + t_{обн1}^B$; $t_{p3OK}^O = t_{отр}^B$; $t_{p3O}^O = 0,1t_{отр}^B$; $t_{p3P}^O = 5t_{отр}^B$.

Для получения обзримых результатов было принято, что за время нахождения ОЭС в зоне обнаружения ЛСР, конфликтующие стороны производят один цикл конфликтного взаимодействия. Полученные в результате моделирования зависимости представлены на рис. 2-6.

Из полученных зависимостей следует очевидный вывод, что вероятность выигрыша ЛСР в конфликте с ОЭС будет тем значительнее, чем больше информационных признаков об объекте разведки используется противником. Это определяет необходимость комплексного решения задачи по повышению разведзащищенности ОЭС. Другими словами, одновременно с повышением скрытности работы ОЭС, необходимо повышать скрытность его носителя [12]. Последняя задача связана со снижением заметности объектов – носителей ОЭС. Применительно к радиолокационному и оптическому диапазону в настоящее время имеется значительный прогресс в ее решении [13]. Поэтому в данной работе мы остановимся на повышении скрытности функционирования самого ОЭС. Одним из подходов к этому может быть упреждающее обнаружение факта разведки ОЭС противником, например, по рассеянному атмосферой излучению [11]. Последнее позволяет установить факт разведки, определить направление на средство разведки и задать для ОЭС такую траекторию сканирования,

чтобы она не пересекалась с траекторией сканирования ЛСР. Для оценки эффективности этого способа проведены исследования зависимости вероятности выигрыша ОЭС в конфликте P_O и информативности изображения наблюдаемой сцены H от площади приемной апертуры ОЭС S'_{an} , нормированной на площадь излучающей апертуры ЛСР (рис. 2). Исследования выполнялись при различных вероятностях правильного обнаружения рассеянного атмосферой излучения ЛСР D , величина которой рассчитывалась по методике, изложенной в [14].

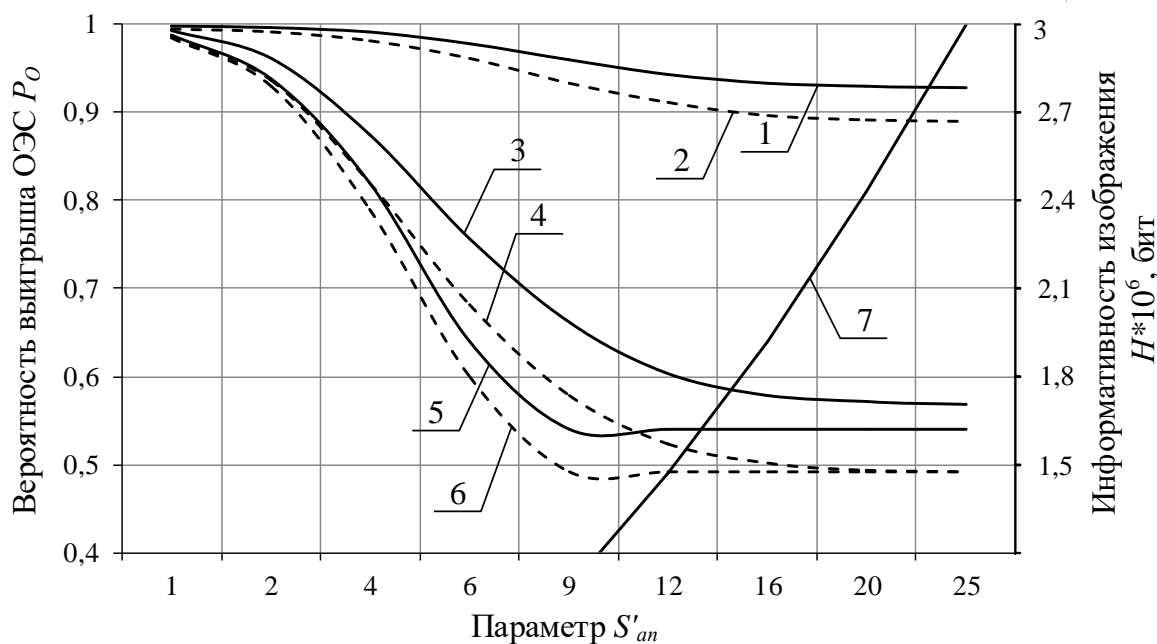


Рис. 2. Зависимости вероятности выигрыша ОЭС в конфликте и информативности формируемого ОЭС изображения от S'_{an} для: 1, 2 – одноэтапного поиска; 3, 4 – двухэтапного поиска; 5, 6 – комбинированного поиска; 1, 3, 5 – $D=0,6$; 2, 4, 6 – $D=0,5$; 7 – $H(S'_{an})$

Полученные зависимости показывают, что с увеличением площади приемной апертуры ОЭС, уменьшается вероятность P_O (зависимости 1-6), что связано с увеличением мощности отраженного от ОЭС зондирующего сигнала ЛСР. Кроме того, с увеличением вероятности D , вероятность выигрыша ОЭС в конфликте с ЛСР увеличивается (зависимости 1, 3, 5 по сравнению с 2, 4, 6 соответственно). Другими словами, обнаружение излучения ЛСР открывает возможность для повышения разведзащищенности ОЭС, которая будет тем выше, чем выше вероятность правильного обнаружения ЛСР. Наряду с этим, из полученных результатов следует, что с увеличением площади приемной апертуры ОЭС, вероятность его выигрыша в конфликте с ЛСР уменьшается, а эффективность работы ОЭС растет (рис. 2, зависимость 7). Это позволяет определить величину S'_{an} , удовлетворяющую требованиям по информативности изображения и разведзащищенности ОЭС.

На рис. 3 представлены зависимости вероятности выигрыша ОЭС P_O в конфликте с ЛСР от коэффициента отражения приемной матрицы ОЭС K_{omp} для различных видов поиска.

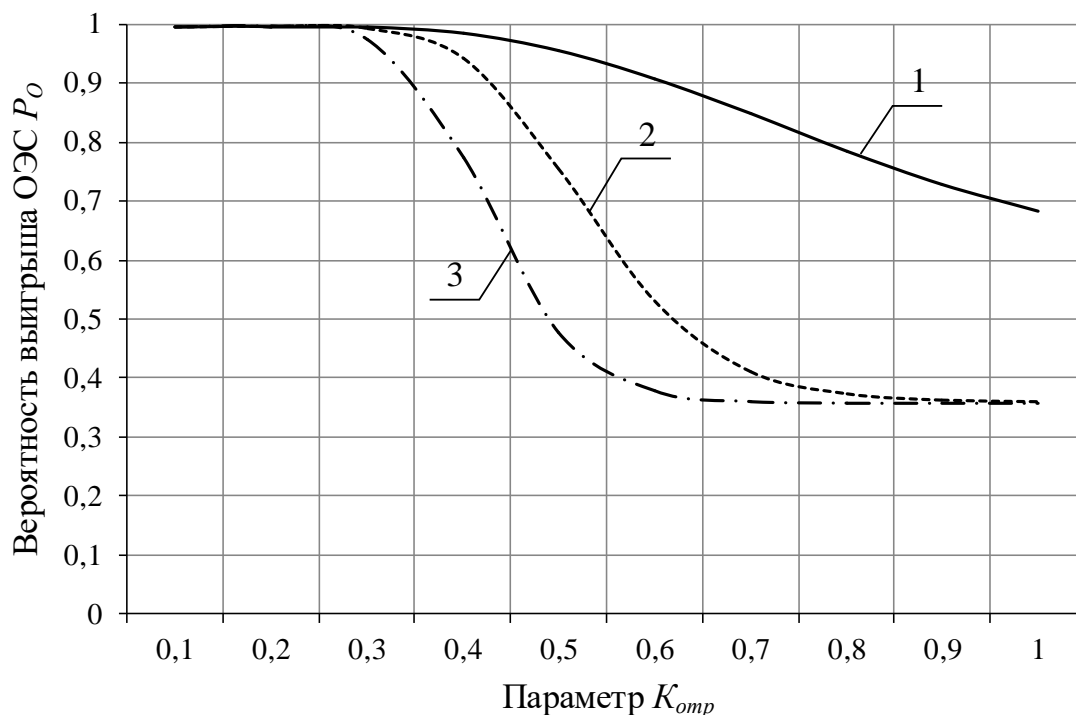


Рис. 3. Зависимости вероятности выигрыша ОЭС в конфликте от K_{omp} для:
1 – одноэтапного поиска; 2 – двухэтапного поиска;
3 – комбинированного поиска

Из приведённых зависимостей видно, что с увеличением коэффициента отражения K_{omp} приемника излучения вероятность P_O убывает. Это происходит вследствие увеличения заметности ОЭС из-за повышения отношения сигнал/шум на приемнике излучения ЛСР. Поэтому для повышения разведзащищенности ОЭС в конфликте следует уменьшать отражательные характеристики его приемника излучения, которые должны быть тем меньше, чем выше техническая оснащённость системы разведки противника. Это связано с уменьшением временного ресурса ОЭС на выполнение мероприятий по защите от ЛСР.

На рис. 4 представлены зависимости вероятности P_O от мощности зондирующего сигнала ЛСР P' для различных видов поиска (P' – мощность, нормированная к пороговой чувствительности приемника излучения).

Установлено, что при $P' < 0,2 \dots 0,4$ (для принятых исходных данных) вероятность P_O уменьшается с увеличением мощности зондирующего сигнала. Как и в предыдущем случае (рис. 3) это происходит вследствие увеличения отношения сигнал/шум на приемнике излучения ЛСР. Дальнейшее увеличение P' ведет к существенному увеличению мощности рассеянного атмосферой лазерного излучения, что, в свою очередь, вызывает повышение вероятности обнаружения ЛСР. Поэтому вероятность выигрыша ОЭС начинает расти.

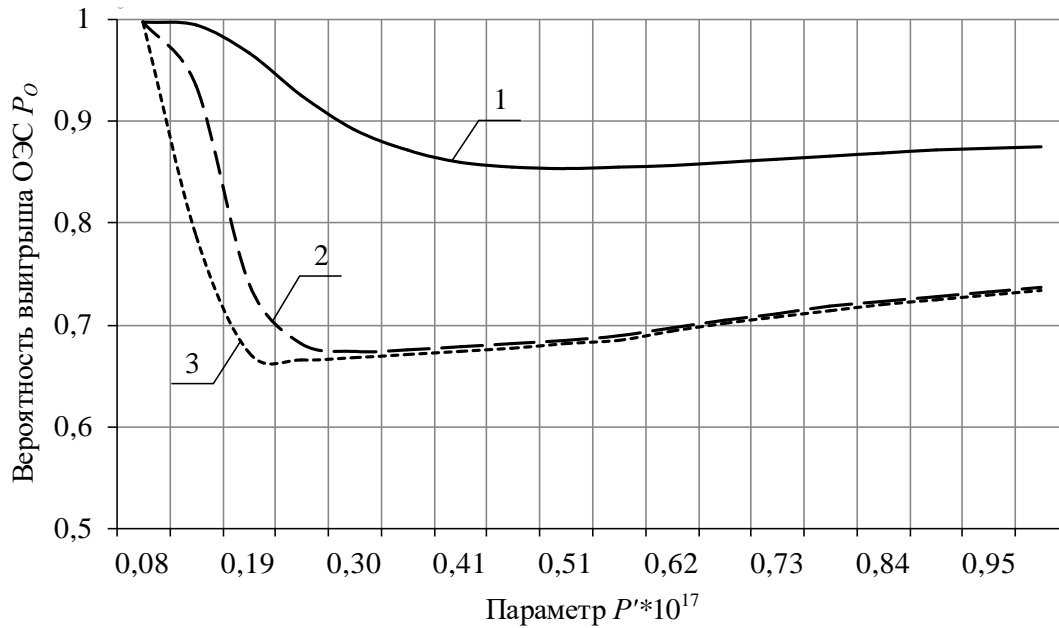


Рис. 4. Зависимости вероятности выигрыша ОЭС в конфликте от P' для:
1 – одноэтапного поиска; 2 – двухэтапного поиска;
3 – комбинированного поиска

На рис. 5 представлены зависимости вероятности выигрыша ОЭС P_O в конфликте от отношения радиуса пространственной когерентности зондирующего излучения ЛСР к радиусу его апертуры R' для различных видов поиска.

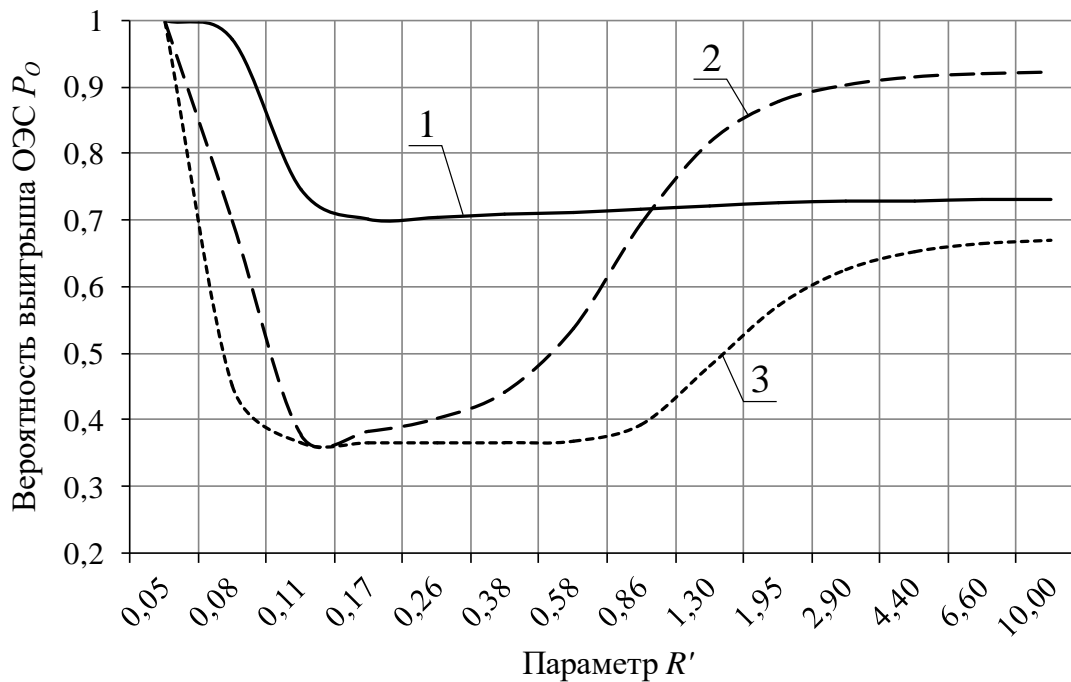


Рис. 5. Зависимости вероятности выигрыша ОЭС в конфликте от R' для:
1 – одноэтапного поиска; 2 – двухэтапного поиска;
3 – комбинированного поиска

Из представленных результатов видно, что зависимости $P_O=f(R')$ носят экстремальный характер. При низкой ($R' < 0,15$) когерентности зондирующего излучения ЛСР, увеличение R' приводит к уменьшению вероятности выигрыша ОЭС в конфликте. Затем с увеличением R' величина P_O начинает расти. Первый результат связан с тем, что при увеличении R' происходит сужение спектра пространственных частот в зондирующем излучении (уменьшение ширины диаграммы направленности передатчика ЛСР). В результате этого плотность энергии в излучении повышается, что, в свою очередь, вызывает рост отношения сигнал/шум на входе приемного устройства ЛСР. Дальнейшее увеличение R' ведет к повышению вероятности выигрыша ОЭС в конфликте. Это связано с тем, что существенное сужение диаграммы направленности передатчика ЛСР в дополнение к увеличению его заметности приводит к увеличению времени просмотра контролируемого сектора и, как следствие, к уменьшению быстродействия ЛСР, что вызывает рост P_O .

Для количественной оценки целесообразности снижения эффективной площади рассеяния ОЭС путем смещения его плоскости наблюдения из плоскости резкого изображения проведены расчеты зависимости вероятности выигрыша ОЭС P_O в конфликте с ЛСР и информативности изображения наблюдаемой сцены от степени расфокусировки ОЭС l_f при различном радиусе приемной апертуры ОЭС R_{an} и различных видах поиска (R_{an} – отношение радиуса приемной апертуры ОЭС к радиусу излучающей апертуры ЛСР). Полученные зависимости представлены на рис. 6. Степень расфокусировки определялась выражением:

$$l_f = \frac{f-l}{f}, \quad (6)$$

где f – фокусное расстояние объектива; l – расстояние от входной апертуры до плоскости наблюдения.

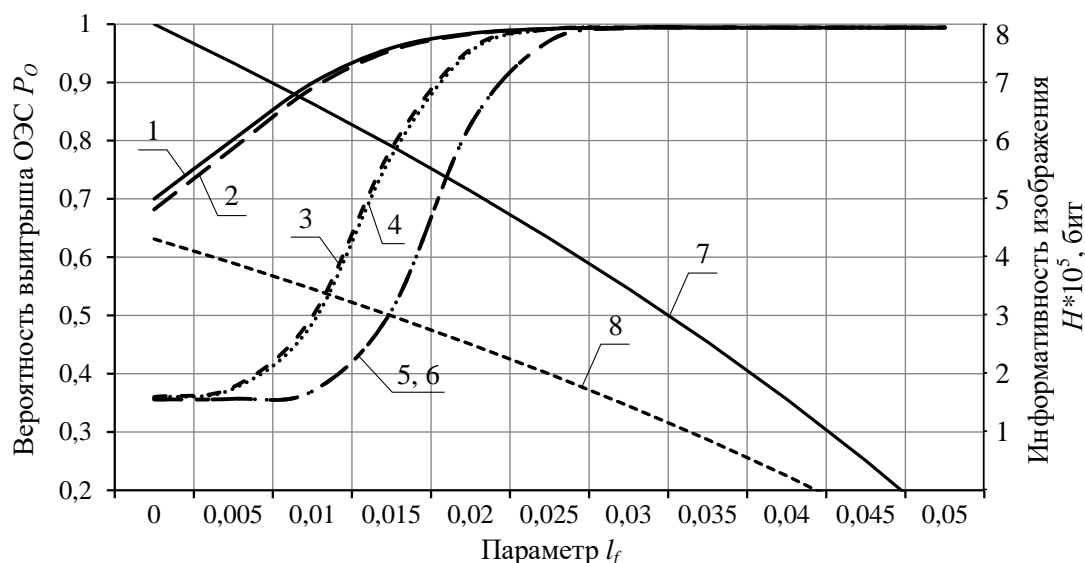


Рис. 6. Зависимости вероятности выигрыша ОЭС в конфликте и информативности формируемого ОЭС изображения от l_f для: 1, 2 – одноэтапного поиска; 3, 4 – двухэтапного поиска; 5, 6 – комбинированного поиска; 1, 3, 5, 7 – $R_{an}=5$; 2, 4, 6, 8 – $R_{an}=10$; 7, 8 – $H(l_f)$

Из рис. 6 (зависимости 1-6) видно, что при увеличении l_f , вероятность выигрыша ОЭС в конфликте возрастает. Причем, чем меньше радиус приемной апертуры ОЭС R_{an} , тем выше вероятность выигрыша P_o . Это связано со снижением заметности ОЭС вследствие уменьшения отношения сигнал/шум на приемнике излучения ЛСР. Также из рис. 6 видно, что с увеличением l_f происходит уменьшение информативности формируемого изображения (зависимости 7, 8). Это связано с уменьшением количества элементов разрешения в кадре изображения наблюдаемой ОЭС сцены. Данный результат позволяет определять величину l_f , удовлетворяющую требованиям по эффективности ОЭС и его РЗ.

Выводы.

Разработан системный подход к обеспечению требуемой РЗ ОЭС. Он основан на представлении конфликтного взаимодействия ОЭС–ЛСР в виде взаимодействия совокупности целостного множества составляющих систему элементов, характеризующих собственными параметрами. Это позволяет определить влияние параметров системы на показатели эффективности функционирования каждой из конфликтующих сторон.

В результате анализа влияния основных параметров ОЭС на их информационные возможности и вероятность выигрыша в конфликте с ЛСР выявлены следующие закономерности:

- увеличение мощности зондирующего сигнала ЛСР приводит не только к уменьшению вероятности выигрыша ОЭС в конфликте, но и к повышению заметности ЛСР, что может быть использовано для повышения вероятности выигрыша ОЭС;
- улучшение пространственной когерентности зондирующего сигнала ЛСР ведет к уменьшению вероятности выигрыша ОЭС в конфликте, но, при этом, увеличивается заметность ЛСР и требуемое время для просмотра контролируемой области, что также может быть использовано для повышения вероятности выигрыша ОЭС;
- уменьшение площади приемной апертуры ОЭС и его расфокусировка ведут к повышению вероятности выигрыша ОЭС в информационном конфликте с ЛСР, но, при этом, информативность принимаемого сигнала уменьшается. Данная связь позволит определить рациональное значение площади апертуры ОЭС и выбрать положение плоскости наблюдения, обеспечивающих получение необходимой информации и требуемую разведзащищенность ОЭС.

Основным элементом новизны представленного решения является системное рассмотрение конфликта ОЭС–ЛСР. Это позволяет количественно оценить влияние площади приемной апертуры ОЭС, его фокусного расстояния, коэффициента отражения приемной матрицы, скорости сканирования на эффективность и РЗ ОЭС с учетом основных параметров ЛСР (длина волны излучения, мощность зондирующего сигнала, радиус пространственной когерентности зондирующего излучения, радиус излучающей апертуры, траектория и скорость сканирования), а также характеристик атмосферы (коэффициента ослаб-

ления и структурной характеристики флуктуаций диэлектрической проницаемости воздуха). Это представляет возможность более корректно обосновывать параметры и режимы работы ОЭС.

Наиболее близкой работой по исследованию влияния характеристик ОЭС на его эффективность в ходе конфликтного взаимодействия с другими средствами является [15]. Однако использованная в ней модель не позволяет определять параметры ОЭС, затрудняющие эффективную работу средств разведки при обеспечении требуемой эффективности функционирования самого ОЭС.

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. Энциклопедия РВСН // Министерство обороны Российской Федерации [Электронный ресурс]. 25.10.2018. – URL: <http://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/listrvsn.htm> (дата обращения: 25.10.2018).
3. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. – М.: Логос, 2012. – 568 с.
4. Уемов А. И. Системный подход и общая теория систем. – М.: Мысль, 1978. – 272 с.
5. Молодык А. В., Конопальцева Л. И. Информативность оптического изображения в оптико-электронных приборах // Оптико-механическая промышленность. 1976. № 8. С. 11-14.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Козирацкий Ю. Л., Донцов А. А., Иванцов А. В., Козирацкий А. Ю., Кусакин О. В., Кущев 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.
10. Дружинин В. В., Конторов Д. С., Конторов М. Д. Введение в теорию конфликта. – М.: Радио и связь, 1989. – 288 с.
11. 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. – 348 с.

12. Военная энциклопедия: в 8 томах / под ред. И.Д. Сергеева. Том 5: Маркировка боеприпасов – «Огайо». – М.: Военное издательство, 2001. – 575 с.

13. Иванкин Е. Ф., Понькин В. А. Теоретические основы получения и защиты информации об объектах наблюдения. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 448 с.

14. Агафонов А. А., Артюх С. С., Афанасьев В. В., Афанасьева Е. М., Бостынец И. П., Быков В. В., Донцов А. А., Ермаков А. И., Калинин А. К., Каунов А. Е., Кирсанов Э. А., Лаптев И. В., Ложкин К. Ю., Марек Я. Л., Миронов В. А., Нечаев С. С., Новиков И. И., Овчаренко Л. А., Огреб С. М., Поддубный В. Н., Понькин В. А., Радзиевский В. Г., Разиньков С. Н., Романов А. Д., Рыжов А. В., Сирота А. А., Соловьев В. В., Сорокин Ю. А., Сухоруков Ю. С., Телков А. Ю., Уфаев В. А., Харченко Т. В., Юхно П. М., Яньшин С. Н. Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии / под ред. В.Г. Радзиевского. – М.: Радиотехника, 2006. – 424 с.

15. Глушков А. Н., Дробышевский Н. В., Кулешов П. Е., Марченко А. В. Динамическая модель процесса защиты оптико-электронного средства от лазерного комплекса функционального поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 3. С. 136-149. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-03/07-Glushkov.pdf> (дата обращения: 19.08.2018).

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. *Ehnciklopediya Raketnyh Vojsk Strategicheskogo Naznacheniya* [Encyclopedia of Strategic Missile Forces]. Available at: <http://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/listrvsn.htm> (accessed 25 October 2018) (in Russian).

3. Yakushenkov Yu. G. *Teoriya i raschet optiko-elektronnyh priborov* [Theory and calculation of optiko-elektronnyh devices]. Moscow, Logos Publ., 2012. 568 p. (in Russian).

4. Uemov A. I. *Sistemnyj podhod i obshchaya teoriya sistem* [System approach and general system theory]. Moscow, Mysl' Publ., 1978. 272 p. (in Russian).

5. Molodyk A. V., Konopal'ceva L. I. Informativnost' opticheskogo izobrazheniya v optiko-elektronnyh priborah [Informativeness of optical image in optical-electronic devices]. *Optiko-mekhanicheskaya promyshlennost'*, 1976, no. 8, pp. 11-14 (in Russian).

6. Abramov P. I., Kuznecov E. V., Skvorcov L. A. Perspektivy primeneniya kvantovo-kaskadnyh lazerov v sistemah optiko-elektronnogo protivodejstviya. 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).

7. 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).

8. Glushkov A. N., Drobyshevskij N. V., Kuleshov P. E., Alabovskij A. V. Sistemnyj podhod k ocenke razveddostupnosti optiko-elektronnyh sredstv [A systematic approach to the assessment of accessibility of reconnaissance of optical-electronic means]. *Radiotekhnika*, 2017, no. 9, pp. 50-54 (in Russian).

9. 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).

10. Druzhinin V. V., Kontorov D. S., Kontorov M. D. *Vvedenie v teoriyu konflikta* [Introduction to the theory of conflict]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1989. 288 p. (in Russian).

11. 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-ehlektronnyh 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).

12. *Voennaya ehnciklopediya* [Military encyclopedia]. Vol. 5. Eds. I. D. Sergeev. Moscow, Voennoe izdatel'stvo Publ., 2001. 575 p. (in Russian).

13. Ivankin E. F., Pon'kin V. A. *Teoreticheskie osnovy polucheniya i zashchity informacii ob ob'ektah nablyudeniya* [Theoretical basis of obtaining and protection of information about the surveillance objects]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2008. 448 p. (in Russian).

14. Agafonov A. A., Artyuh S. S., Afanas'ev V. V., Afanas'eva E. M., Bostynec I. P., Bykov V. V., Doncov A. A., Ermakov A. I., Kalinkov A. K., Kaunov A. E., Kirsanov E. A., Laptev I. V., Lozhkin K. Yu., Marek Ya. L., Mironov V. A., Nechaev S. S., Novikov I. I., Ovcharenko L. A., Ogreb S. M., Poddubnyj V. N., Pon'kin V. A., Radzievskij V. G., Razin'kov S. N., Romanov A. D., Ryzhov A. V., Sirota A. A., Solov'ev V. V., Sorokin Yu. A., Suhorukov Yu. S., Telkov A. Yu., Ufaev V. A., Harchenko T. V., Yuhno P. M., Yan'shin S. N. *Sovremennaya radioelektronnaya bor'ba. Voprosy metodologii* [Modern radioelectronic warfare. Methodological issues]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006. 424 p. (in Russian).

15. Glushkov A. N., Drobyshevskij N. V., Kuleshov P. E., Marchenko A. V. Dynamic Model of Protection Process of an Optical-Electronic Means from a Laser Complex of Functional Damage. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 3, pp. 136-149. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-03/07-Glushkov.pdf> (accessed 19 August 2018) (in Russian).

Статья поступила 9 октября 2018 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

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: rekulesh@yandex.ru

Дробышевский Николай 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: d_n.v@mail.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

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

A system approach to ensuring the required intelligence protection of optical-electronic means

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

Statement of the problem. *The parameters of the objects of protection differently affect their effectiveness and secrecy, which complicates the secrecy of the functioning of optical-electronic means in the conditions of their work in the detection area of intelligence means of the conflicting party. On the basis, it is necessary to determine the parameters of optical-electronic means that reduce the effectiveness of the work of intelligence means while ensuring the required efficiency of the functioning of the optical devices themselves. Purpose of the work is to develop a system approach to ensuring the required intelligence protection of optical-electronic means and to analyze the impact of the main parameters of devices – participants of the conflict on the characteristics of winning it. The novelty of the work is system consideration of the conflict «optical-electronic means – laser means of intelligence» at various stages of the parties' functioning, that allowed to determine the parameters of optical-electronic means, which are reduce the effectiveness of the work of intelligence means while ensuring the required efficiency of the functioning of the optical-electronic means. Result.* *The authors have developed a system approach to ensure the required intelligence protection of optical-electronic means based on a complex analysis of the influence of the main parameters of intelligence laser radars and protected objects on the efficiency of solving tasks performed by the means. Practical relevance.*

The obtained dependencies allow assaying of the contribution of technical parameters of the conflicting parties to the characteristics of the win in the conflict and, as a result, more correctly justify their parameters and operation modes.

Key words: *intelligence protection, optical-electronic means, laser means of intelligence, functional damage, informative of image.*

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

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

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

Aleksandr Vasil'evich Marchenko – 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 re-search: information conflict for optical-electronic systems. E-mail: Mav89202125904@yandex.ru

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