

УДК 623.624.2

Моделирование конфликтного взаимодействия оптико-электронных средств беспилотных летательных аппаратов и лазерных комплексов

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

Постановка задачи: обеспечение защиты оптико-электронных средств в условиях их работы в зоне действия лазерных комплексов противника осложняется тем, что параметры объектов защиты неодинаково влияют на их эффективность в условиях лазерного противодействия. Исходя из этого, необходимо определить параметры средств защиты, обеспечивающие эффективное выполнение оптико-электронными средствами целевых задач при максимальном выигрыше в конфликте. **Целью работы** является исследование процесса конфликтного взаимодействия разведывательных оптико-электронных средств беспилотных летательных аппаратов и лазерных комплексов противника в зависимости от параметров сторон на всех стадиях их функционирования. **Новизна работы** заключается в применении системных методов исследования, позволяющих рассматривать динамику конфликта и его основные характеристики во взаимосвязи с действиями конфликтующих сторон. **Результат:** разработана математическая модель процесса защиты оптико-электронных средств от лазерных комплексов противника, которая позволяет определять влияние параметров конфликтующих сторон на вероятность выигрыша в конфликте и, как следствие, определить пути защиты оптико-электронных средств от лазерных комплексов. **Практическая значимость:** выявлены закономерности, позволяющие обосновано выбирать параметры средств защиты, обеспечивающие эффективное выполнение оптико-электронными средствами целевых задач при максимальном выигрыше в конфликте.

Ключевые слова: оптико-электронное средство, лазерный комплекс, конфликтное взаимодействие, вероятность состояния, пропуск цели.

Введение

Современный этап развития науки и техники характеризуется широким применением оптико-электронных средств (ОЭС) в различных областях человеческой деятельности. ОЭС широко применяются в системах технического зрения различных отраслей промышленного производства, авиации, космонавтике, в научных исследованиях, медицине, системах связи, системах военного назначения и других системах. Обычно функционирование этих систем может происходить в условиях преднамеренно организованного или непреднамеренного конфликта с другими системами. Первый особенно актуален для систем военного назначения. Именно он и является объектом исследования в настоящей работе. Суть этого конфликта заключается в том, что ОЭС стремятся получить как можно больше информации об объектах противостоящей стороны, а она противодействует ей в этом [1]. Для противодействия ОЭС в настоящее время в развитых странах предполагается широко использовать лазерные ком-

Библиографическая ссылка на статью:

Глушков А. Н., Марченко А. В., Кулешов П. Е. Моделирование конфликтного взаимодействия оптико-электронных средств беспилотных летательных аппаратов и лазерных комплексов // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 4. С. 240-270. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10409

Reference for citation:

Glushkov A. N., Marchenko A. V., Kuleshov P. E. Modeling a conflict interaction between UAV's optoelectronic equipment and laser systems. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 4, pp. 240-270 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10409

плексы (ЛК). Они представляют сложные системы вооружения, осуществляющие поражение целей энергией мощного лазерного излучения (МЛИ) и включающие в свой состав лазерную станцию разведки (ЛСР) целей, систему наведения МЛИ, мощную лазерную установку (МЛУ) и подсистему управления. Среди подобных образцов вооружения обращают на себя внимание такие комплексы, как Stryker Mehel, Helmd, Helws, M-SHORAD наземный боевой лазерный комплекс, лазерная установка LWSD Mk 2 Mod (разработчик США) [2, 3, 4, 5] и другие. Противодействие ОЭС с помощью этих систем осуществляется путем поражения лазерной энергией носителя ОЭС, обратимого или необратимого вывода из строя разведывательной аппаратуры, а также путем искажения добываемой ОЭС информации.

На рис. 1 приведена схема конфликта ОЭС–ЛК. Принято, что ОЭС состоит из подсистемы защиты от разведки, подсистемы защиты от поражения МЛИ и подсистемы управления. ЛК располагает для защиты от съема информации мощной лазерной установкой, выполняющим разведку объектов поражения с помощью ЛСР, наведения на них МЛИ и его генерацию.

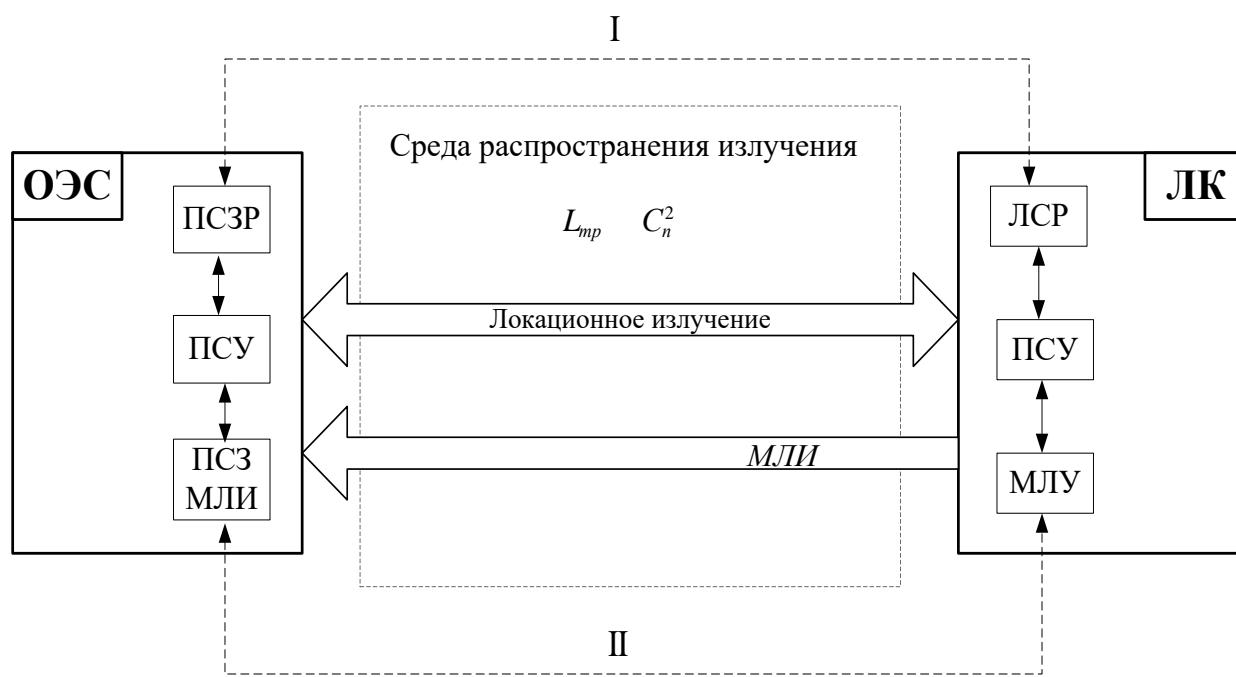


Рис. 1. Структурная схема конфликта ОЭС–ЛК

Конфликт ОЭС–ЛК рассматривается в два этапа, на I этапе ОЭС проводит съём в заданном районе информации, в подсистему управления (ПСУ) ЛК поступает целеуказание после чего поступления которого, комплекс наводит МЛИ на ОЭС и осуществляет его разведку. На II этапе ЛК производится наведение поражающего импульса на цель с последующей генерацией МЛИ. В свою очередь ПСУ ОЭС на I этапе взаимодействия применяет через подсистему защиты от разведки (ПСЗР) защитные меры от ЛСР. Если данные меры не позволили произвести скрытие ОЭС БЛА, то ПСУ ОЭС выдает команду в подсистему защиты от МЛИ (ПСЗ МЛИ) и осуществляется защита ОЭС от поражающего воздействия МЛИ.

Для организации эффективной защиты ОЭС от подобных систем необходимы исследования процесса конфликтного взаимодействия ОЭС и ЛК в основных состояниях их функционирования в зависимости от вероятностных и временных характеристик сторон конфликта. Результаты этих исследований позволят определять влияние параметров конфликтующих сторон на вероятность выигрыша в конфликте и, как следствие, определить пути защиты ОЭС от ЛК. Решение этой задачи является предметом исследований настоящей работы. Целью работы является исследование процесса конфликтного взаимодействия разведывательных ОЭС беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и ЛК противника в зависимости от параметров сторон на всех стадиях их функционирования.

Перспективным подходом к решению сформулированной задачи является применение системных методов исследования, позволяющих рассматривать динамику конфликта и его основные характеристики во взаимосвязи с действиями сторон и их параметрами. Для получения обобщимых результатов будем исходить из следующего. В соответствии с теорией эффективности систем вооружения [6] эффективность противодействия ОЭС БЛА ЛК определяется вероятностью противодействия, которая может быть оценена по формуле:

$$P_{np} = 1 - P_p P_n, \quad (1)$$

где P_p , P_n – соответственно вероятности получения противником информации, необходимой для поражения ОЭС БЛА ЛК, и вероятность создания на выходном зрачке ОЭС БЛА ЛК энергии, превышающей порог поражения ОЭС

Данная формула позволяет определить стратегию защиты ОЭС БЛА от ЛК, которая состоит в проведении организационных и технических мероприятий, направленных на минимизацию значений вероятностей P_p и P_n . Достижение цели исследований требует разработки модели конфликта и исследования его основных характеристик во взаимосвязи с действиями сторон.

Следует отметить, что в сформулированной постановке рассматриваемая задача не нова. В работах [7-9] проводились исследования процесса конфликтного взаимодействия разведывательных ОЭС БЛА и ЛСР противника. Полученные результаты относятся к конфликтному взаимодействию ЛСР и ОЭС БЛА и по своей сути не затрагивают в полной мере вероятностей P_n P_{np} . Это обусловило необходимость постановки данной работы.

Модель процесса конфликтного взаимодействия ОЭС–ЛК

Для исследования процесса конфликтного взаимодействия ОЭС–ЛК разработан граф состояний, описывающий их конфликтное взаимодействие (рис. 2). Предполагается, что одновременно не может произойти более одного изменения состояний сторон.

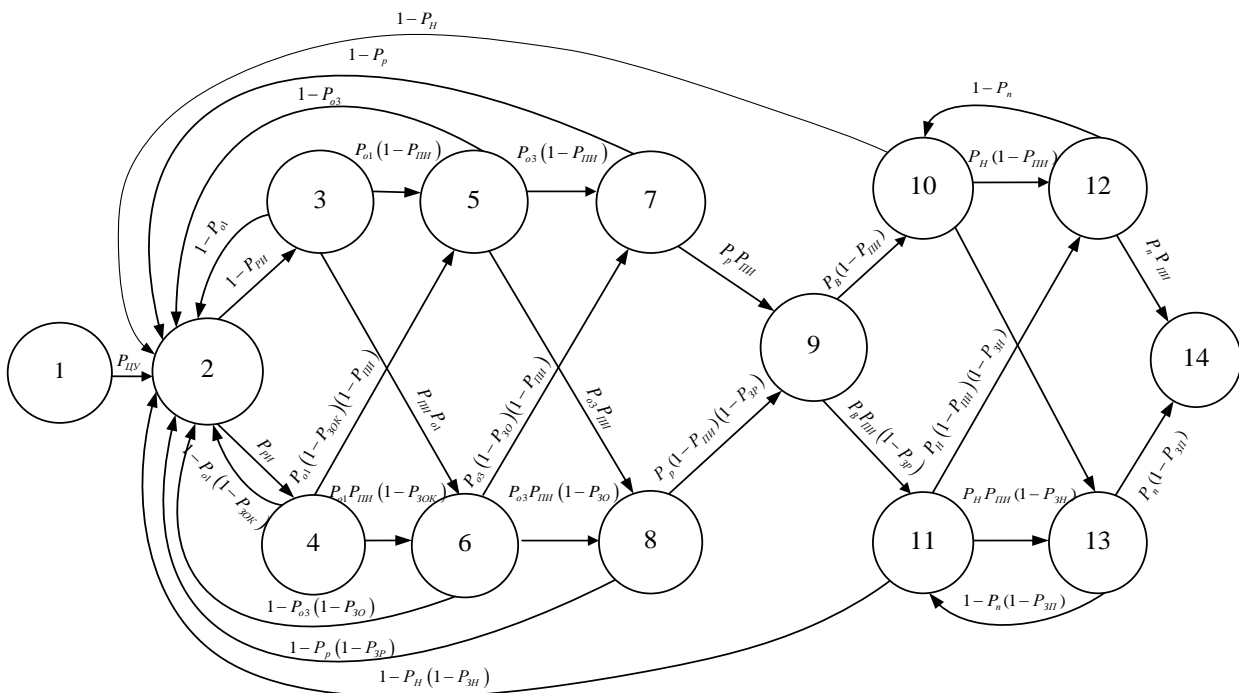


Рис. 2. Граф состояний сторон конфликта ОЭС–ЛК

В приведенном графе введены следующие состояния:

- 1 – ЛСР ЛК ожидает целеуказание (ЦУ); ОЭС ведет разведку заданной области и мониторинг излучений ЛК;
- 2 – ЛСР обрабатывает ЦУ; ОЭС ведет разведку заданной области и мониторинг излучений ЛК;
- 3 – ЛСР осуществляет поиск ОЭС; ОЭС ведет разведку заданной области и мониторинг излучений ЛК (излучение ЛСР не обнаружено);
- 4 – ЛСР осуществляет поиск ОЭС; ОЭС обнаруживает рассеянное атмосферой излучение ЛСР и осуществляет защиту от оптического контакта с ЛСР;
- 5 – ЛСР осуществляет обнаружение ОЭС; ОЭС ведет разведку заданной области и мониторинг излучений ЛСР (прямое излучение ЛСР не обнаружено);
- 6 – ЛСР осуществляет обнаружение ОЭС; ОЭС обнаруживает прямое излучение ЛСР и осуществляет защиту от обнаружения;
- 7 – ЛСР осуществляет распознавание ОЭС; ОЭС ведет разведку заданной области и мониторинг излучений ЛСР (не обнаруживая прямое излучение ЛСР);
- 8 – ЛСР осуществляет распознавание ОЭС; ОЭС обнаруживает прямое излучение ЛСР и осуществляет защиту от распознавания средством разведки;
- 9 – ЛСР выдает информацию в подсистему управления ЛК – выигрыш в информационном конфликте с ОЭС;
- 10 – ЛК осуществляет наведение МЛИ на ОЭС, которое ведет разведку заданной области и мониторинг излучений ЛК;

11 – ЛК осуществляет наведение МЛИ на ОЭС; ОЭС ведет разведку, обнаруживает прямое излучение ЛСР и осуществляет защиту от наведения поражающего импульса ЛК;

12 – ЛК излучает поражающий импульс; ОЭС МЛИ ЛК не обнаруживает;

13 – ЛК осуществляет излучение поражающего импульса; ОЭС обнаруживает излучение поражающего импульса ЛК и осуществляет защиту от него;

14 – выигрыш в конфликте ЛК (пропуск цели).

ОЭС в состоянии 1 (начальное состояние рис. 2) проводит съем в заданном районе информации, при этом подсистема защиты от ЛК находится в состоянии ожидания команды на включение режимов защиты. ЛК в состоянии 1 находится в режиме ожидания ЦУ (например, от радиолокационной станции), после поступления которого, комплекс наводится на ОЭС с ошибкой, определяемой точностью ЦУ - состояние 2. Затем ЛК переходит в режим поиска ОЭС, в котором в поле ошибок ЦУ осуществляет просмотр пространства до получения отраженного от объекта сигнала – состояние 3 или 4 (в зависимости от режима функционирования ОЭС). При нахождении ОЭС в зоне возможного воздействия противника одновременно с реализацией основной целевой функции производится мониторинг излучений противника. Это позволяет обнаружить функционирование ЛК по рассеянному атмосферой или прямому излучению. При не обнаружении ОЭС рассеянного атмосферой излучения ЛК система ОЭС–ЛК переходит в состояние 3. При обнаружении рассеянного излучения, подсистема управления ОЭС выдает команду в подсистему защиты на включение режима защиты от оптического контакта с ЛК, например, путем установления соответствующего закона сканирования ОЭС (переход в состояние 4). В случае не обнаружения средством разведки отраженного от ОЭС сигнала, система ОЭС–ЛК переходит в состояние 2. Если ЛК, обнаруживает отраженный от ОЭС сигнал, то система переходит в состояние 5 или 6, в которых проводится обнаружение ОЭС. Решение о наличии ОЭС принимается в соответствии с логикой: обнаружение не менее m отраженных от объекта импульсов из n излученных. При не обнаружении ОЭС прямого излучения от ЛК система ОЭС–ЛК переходит в состояние 5. В противном случае в ОЭС включается режим защиты от обнаружения, например, путем смещения матрицы фотоприемников из плоскости наблюдения (расфокусировка принимаемого излучения) и система ОЭС–ЛК переходит в состояние 6. В случае не обнаружения средством разведки ЛК ОЭС, система переходит в состояние 2. При обнаружении ОЭС в ЛК осуществляется распознавание, и система переходит в состояние 7 или 8. Если ОЭС не обнаруживает прямое излучение от ЛК, то система ОЭС–ЛК переходит в состояние 7, в обратном случае – в состояние 8. В этом состоянии в системе ОЭС может быть использована защита от распознавания, заключающаяся в имитации распознаваемого объекта с помощью ложной цели, например, углового оптического отражателя. В случае не распознавания средством разведки ОЭС, система переходит в состояние 2. В случае распознавания ОЭС ЛК выдает информацию о нем в подсистему управления ЛК (состояние 9), по командам, которой происходит наведение поражающего импульса на цель, система переходит в состояние 10 или 11. Если ОЭС не обнаруживает прямое излучение ЛК,

то система ОЭС–ЛК переходит в состояние 10, в обратном случае – в состояние 11 и производит защиту от наведения поражающего импульса ЛК. В случае неточного наведения поражающего импульса на ОЭС, система переходит в состояние 2. В случае перехода системы в состояние 12 или 13, считается, что ЛК захватил цель. Если ОЭС не обнаруживает прямое излучение от ЛК, то система ОЭС–ЛК переходит в состояние 12, в обратном случае – в состояние 13 и производит защиту от МЛИ ЛК. В случае не поражения МЛИ ОЭС, система переходит в состояние 10 и производит повторное наведение поражающего импульса на ОЭС. Этот цикл повторяется до тех пор (в рамках существующих временного и энергетического ресурсов), пока система не перейдет в состояние 14 (выигрыш в конфликте ЛК) при условии, что БЛА находится в зоне действия ЛК. ЛК, при наличии повторного целеуказания, повторяет цикл разведки ОЭС. Переходы из состояний 4, 6, 8, 11, 13 являются конфликтно обусловленными, так как зависят от успешного выполнения соответствующих режимов функционирования противостоящей стороной.

Исследуемый процесс при неограниченном времени конфликта будет стремиться в финальное состояние – 14 с вероятностью равной 1. Отличие рассматриваемого случая от указанного состоит в том, что время нахождения БЛА в зоне поражения ЛК ограничено. Задача состоит в том, что для ограниченного периода взаимодействия необходимо определить стратегию поведения БЛА и его параметры, позволяющие добиться максимального выигрыша в конфликте с учетом действий ЛК, его параметров и внешних условий взаимодействия.

Оценка значений вероятностей выигрыша в информационном конфликте может быть выполнена с использованием аппарата теории полумарковских случайных процессов. В качестве количественной меры оценки состояний конфликта примем плотность распределения вероятностей состояния частных результирующих выигрышей к моменту времени t . Для полумарковских процессов данная оценка определяется выражением [10]:

$$B_j(t) = \sum_{i=1}^n P_{ij} \int_0^t B_i(\tau) \omega_{ij}(t-\tau) d\tau. \quad (2)$$

Для математического описания процесса к взаимодействию ОЭС с ЛК введены плотности вероятностей времени пребывания системы ОЭС–ЛК в состоянии i при переходе в состояние j – $\omega_{ij}(\tau)$. В них $\tilde{P}_i(\tau)$ вероятность того, что в интервале времени $(t, t + \tau)$ система ОЭС–ЛК попадет в состояние i . Характеристики переходов из состояний системы ОЭС–ЛК (рис. 2) сведены в таблицу 1. Принято, что вероятностные характеристики конфликта определяются потенциальными вероятностями переходов из одного состояния в другое, а временные характеристики конфликта определяются средними значениями времен ожидания переходов.

Таблица 1 – Характеристики переходов из состояний системы ОЭС–ЛК

№	Вероятностные характеристики конфликта	Временные характеристики конфликта
1	Вероятность выдачи целеуказания $P_{ЦУ}$	Среднее время выдачи команды на обнаружение ОЭС t_k
2	Вероятность обнаружения ОЭС рассеянного излучения ЛСР P_{PI}	Среднее время обнаружения ОЭС рассеянного атмосферой излучения ЛСР t_{PI} . Среднее время наведения ЛСР на ОЭС t_{HI}
3	Вероятность обнаружения ЛСР первого отраженного от ОЭС сигнала P_{o1} . Вероятность обнаружения ОЭС прямого излучения ЛСР P_{III}	Среднее время обнаружения ЛСР первого отраженного от ОЭС сигнала t_{o1} . Среднее время обнаружения ОЭС прямого излучения ЛСР t_{III}
4	Вероятность обнаружения ЛСР первого отраженного от ОЭС сигнала P_{o1} . Вероятность обнаружения ОЭС прямого излучения ЛСР P_{III} Вероятность защиты ОЭС от оптического контакта с ЛСР P_{3OK}	Среднее время обнаружения ЛСР первого отраженного от ОЭС сигнала t_{o1} Среднее время обнаружения ОЭС прямого излучения ЛСР t_{III} Среднее время выполнения режима защиты ОЭС от оптического контакта с ЛСР t_{3OK}
5	Вероятность обнаружения ЛСР не менее m отраженных от ОЭС сигналов из n излученных импульсов P_{o3} . Вероятность обнаружения ОЭС прямого излучения ЛСР P_{III}	Среднее время обнаружения ЛСР не менее m отраженных от ОЭС сигналов из n излученных импульсов t_{o3} . Среднее время обнаружения ОЭС прямого излучения ЛСР t_{III}
6	Вероятность обнаружения ЛСР не менее m отраженных от ОЭС сигналов из n излученных импульсов P_{o3} . Вероятность обнаружения ОЭС прямого излучения ЛСР P_{III} . Вероятность защиты ОЭС от обнаружения ЛСР P_{30}	Среднее время обнаружения ЛСР не менее m отраженных от ОЭС сигналов из n излученных импульсов t_{o3} . Среднее время обнаружения ОЭС прямого излучения ЛСР t_{III} . Среднее время выполнения режима защиты ОЭС от обнаружения ЛСР t_{30}
7	Вероятность распознавания ОЭС P_p	Среднее время распознавания ОЭС t_p
8	Вероятность распознавания ОЭС P_p Вероятность защиты ОЭС от распознавания ЛСР P_{3p}	Среднее время распознавания ОЭС t_p . Среднее время выполнения режима защиты ОЭС от распознавания ЛСР t_{3p}
9	Выдача информации в ПУ ЛК – выигрыш в информационном конфликте Вероятность пропуска цели P_B	Среднее время выдачи команды $t_{к1} = t_p$
10	Вероятность наведения на ОЭС P_H	Среднее время наведения ОЭС t_H
11	Вероятность наведения на ОЭС P_H Вероятность защиты ОЭС от наведения ЛК P_{3H}	Среднее время наведения ОЭС t_H Среднее время выполнения режима защиты ОЭС от наведения ЛСР t_{3H}
12	Вероятность поражения ОЭС P_n	Среднее время поражения ОЭС t_n
13	Вероятность поражения ОЭС P_n Вероятность защиты ОЭС от поражения ЛК $P_{3П}$	Среднее время поражения ОЭС t_n Среднее время включения средств защиты ОЭС от поражения ЛК $t_{3П}$
14	Выигрыш ОЭС в конфликте с ЛК P_{np}	

Исходя из динамики конфликта и его вероятностных характеристик из таблицы 1 переходные вероятности P_{ij} из состояния i в j определяются выражениями:

$$\begin{aligned}
 P_{12} &= P_{ЦУ}, \\
 P_{23} &= 1 - P_{PH}, \\
 P_{24} &= P_{PH}, \\
 P_{32} &= 1 - P_{o1}, \\
 P_{35} &= P_{o1} (1 - P_{III}), \\
 P_{36} &= P_{III} P_{o1}, \\
 P_{42} &= 1 - P_{o1} (1 - P_{3OK}), \\
 P_{45} &= P_{o1} (1 - P_{3OK}) (1 - P_{III}), \\
 P_{46} &= P_{o1} P_{III} (1 - P_{3OK}), \\
 P_{52} &= 1 - P_{o3}, \\
 P_{57} &= P_{o3} (1 - P_{III}), \\
 P_{58} &= P_{o3} P_{III}, \\
 P_{62} &= 1 - P_{o3} (1 - P_{3O}), \\
 P_{67} &= P_{o3} (1 - P_{3O}) (1 - P_{III}), \\
 P_{68} &= P_{o3} P_{III} (1 - P_{3O}), \\
 P_{72} &= 1 - P_p, \\
 P_{79} &= P_p P_{III}, \\
 P_{82} &= 1 - P_p (1 - P_{3P}), \\
 P_{89} &= P_p (1 - P_{III}) (1 - P_{3P}), \\
 P_{910} &= P_B (1 - P_{III}), \\
 P_{911} &= P_B P_{III} (1 - P_{3P}), \\
 P_{102} &= 1 - P_H, \\
 P_{1012} &= P_H (1 - P_{III}), \\
 P_{1013} &= P_H P_{III}, \\
 P_{112} &= 1 - P_H (1 - P_{3H}), \\
 P_{1112} &= P_H (1 - P_{III}) (1 - P_{3H}), \\
 P_{1113} &= P_H P_{III} (1 - P_{3H}), \\
 P_{1210} &= 1 - P_n, \\
 P_{1214} &= P_n P_{III}, \\
 P_{1311} &= 1 - P_n (1 - P_{3П}), \\
 P_{1314} &= P_n (1 - P_{3П}).
 \end{aligned} \tag{3}$$

Тогда вероятности перехода в системе ОЭС–ЛК для одного цикла взаимодействия в соответствии с [1] и (2) опишем системой уравнений:

$$\begin{aligned}
 \tilde{P}_1(t) &= 1 - \tilde{P}_2(t) - \tilde{P}_3(t) - \tilde{P}_4(t) - \tilde{P}_5(t) - \tilde{P}_6(t) - \tilde{P}_7(t) - \tilde{P}_8(t) - \tilde{P}_9(t) - \tilde{P}_{10}(t) - \tilde{P}_{11}(t) - \\
 &\quad - \tilde{P}_{12}(t) - \tilde{P}_{13}(t) - \tilde{P}_{14}(t); \\
 \tilde{P}_2(t) &= \tilde{P}_2 \delta(t) + \int_0^t [\tilde{P}_1(\tau) P_{12} \omega_{12}(t') + \tilde{P}_3(\tau) P_{32} \omega_{32}(t') (1 - \tilde{P}_3(\tau) Y_{35}(\tau)) (1 - \tilde{P}_3(\tau) Y_{36}(\tau)) + \\
 &\quad + \tilde{P}_4(\tau) P_{42} \omega_{42}(t') (1 - \tilde{P}_4(\tau) Y_{45}(\tau)) (1 - \tilde{P}_4(\tau) Y_{46}(\tau)) + \tilde{P}_5(\tau) P_{52} \omega_{52}(t') (1 - \tilde{P}_5(\tau) Y_{57}(\tau)) + \\
 &\quad + (1 - \tilde{P}_5(\tau) Y_{58}(\tau)) + \tilde{P}_6(\tau) P_{62} \omega_{62}(t') (1 - \tilde{P}_6(\tau) Y_{67}(\tau)) (1 - \tilde{P}_6(\tau) Y_{68}(\tau)) + \\
 &\quad + \tilde{P}_7(\tau) P_{72} \omega_{72}(t') (1 - \tilde{P}_7(\tau) Y_{79}(\tau)) + \tilde{P}_8(\tau) P_{82} \omega_{82}(t') (1 - \tilde{P}_8(\tau) Y_{89}(\tau)) + \\
 &\quad + \tilde{P}_{10}(\tau) P_{102} \omega_{92}(t') (1 - \tilde{P}_{10}(\tau) Y_{1012}(\tau)) (1 - \tilde{P}_{10}(\tau) Y_{1013}(\tau)) + \\
 &\quad + \tilde{P}_{11}(\tau) P_{11} \omega_{112}(t') (1 - \tilde{P}_{1112}(\tau) Y_{1113}(\tau))] \times (1 - \tilde{P}_2(\tau) Y_{23}(\tau)) (1 - \tilde{P}_2(\tau) Y_{24}(\tau)) d\tau; \\
 \tilde{P}_3(t) &= P_3 \delta(t) + P_{23} \int_0^t \tilde{P}_2(\tau) \omega_{23}(t') (1 - \tilde{P}_2(\tau) Y_{24}(\tau)) (1 - \tilde{P}_3(\tau) Y_{32}(\tau)) \times \\
 &\quad \times (1 - \tilde{P}_3(\tau) Y_{35}(\tau)) (1 - \tilde{P}_3(\tau) Y_{36}(\tau)) d\tau;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tilde{P}_4(t) &= P_4\delta(t) + P_{24} \int_0^t \tilde{P}_2(\tau)\omega_{24}(t') (1-\tilde{P}_2(\tau)Y_{23}(\tau))(1-\tilde{P}_4(\tau)Y_{42}(\tau)) \times \\
 &\times (1-\tilde{P}_4(\tau)Y_{45}(\tau))(1-\tilde{P}_4(\tau)Y_{46}(\tau)) d\tau; \\
 \tilde{P}_5(t) &= P_5\delta(t) + \int_0^t [\tilde{P}_3(\tau)P_{35}\omega_{35}(t') (1-\tilde{P}_3(\tau)Y_{32}(\tau))(1-\tilde{P}_3(\tau)Y_{36}(\tau)) + \\
 &+ \tilde{P}_4(\tau)P_{45}\omega_{45}(t') (1-\tilde{P}_4(\tau)Y_{42}(\tau))(1-\tilde{P}_4(\tau)Y_{46}(\tau))] \times \\
 &\times (1-\tilde{P}_5(\tau)Y_{52}(\tau)) \times (1-\tilde{P}_5(\tau)Y_{57}(\tau))(1-\tilde{P}_5(\tau)Y_{58}(\tau)) d\tau; \\
 \tilde{P}_6(t) &= P_6\delta(t) + \int_0^t [\tilde{P}_3(\tau)P_{36}\omega_{36}(t') (1-\tilde{P}_3(\tau)Y_{32}(\tau))(1-\tilde{P}_3(\tau)Y_{35}(\tau)) + \\
 &+ \tilde{P}_4(\tau)P_{46}\omega_{46}(t') (1-\tilde{P}_4(\tau)Y_{42}(\tau))(1-\tilde{P}_4(\tau)Y_{45}(\tau))] \times \\
 &\times (1-\tilde{P}_6(\tau)Y_{62}(\tau))(1-\tilde{P}_6(\tau)Y_{67}(\tau))(1-\tilde{P}_6(\tau)Y_{68}(\tau)) d\tau; \\
 \tilde{P}_7(t) &= P_7\delta(t) + \int_0^t [\tilde{P}_5(\tau)P_{57}\omega_{57}(t') (1-\tilde{P}_5(\tau)Y_{52}(\tau))(1-\tilde{P}_5(\tau)Y_{58}(\tau)) + \tilde{P}_6(\tau)P_{67}\omega_{67}(t') \times \\
 &\times (1-\tilde{P}_6(\tau)Y_{68}(\tau))(1-\tilde{P}_6(\tau)Y_{62}(\tau))] (1-\tilde{P}_7(\tau)Y_{72}(\tau))(1-\tilde{P}_7(\tau)Y_{79}(\tau)) d\tau; \\
 \tilde{P}_8(t) &= P_8\delta(t) + \int_0^t [\tilde{P}_6(\tau)P_{68}\omega_{68}(t') (1-\tilde{P}_6(\tau)Y_{62}(\tau))(1-\tilde{P}_6(\tau)Y_{67}(\tau)) + \\
 &+ \tilde{P}_5(\tau)P_{58}\omega_{58}(t') (1-\tilde{P}_5(\tau)Y_{57}(\tau))(1-\tilde{P}_5(\tau)Y_{52}(\tau))] (1-\tilde{P}_8(\tau)Y_{89}(\tau))(1-\tilde{P}_8(\tau)Y_{82}(\tau)) d\tau; \\
 \tilde{P}_9(t) &= P_9\delta(t) + \int_0^t [\tilde{P}_7(\tau)P_{79}\omega_{79}(t') (1-\tilde{P}_7(\tau)Y_{72}(\tau)) + \tilde{P}_8(\tau)P_{89}\omega_{89}(t') \times \\
 &\times (1-\tilde{P}_8(\tau)Y_{82}(\tau))] (1-\tilde{P}_9(\tau)Y_{910}(\tau))(1-\tilde{P}_9(\tau)Y_{911}(\tau)) d\tau; \\
 \tilde{P}_{10}(t) &= P_{10}\delta(t) + \int_0^t [\tilde{P}_9(\tau)P_{910}\omega_{910}(t') (1-\tilde{P}_9(\tau)Y_{910}(\tau)) + \tilde{P}_{12}(\tau)P_{1210}\omega_{1210}(t') \times \\
 &\times (1-\tilde{P}_{12}(\tau)Y_{1214}(\tau))] (1-\tilde{P}_{10}(\tau)Y_{102}(\tau))(1-\tilde{P}_{10}(\tau)Y_{1012}(\tau))(1-\tilde{P}_{10}(\tau)Y_{1013}(\tau)) d\tau; \\
 \tilde{P}_{11}(t) &= P_{11}\delta(t) + \int_0^t [\tilde{P}_9(\tau)P_{911}\omega_{911}(t') (1-\tilde{P}_9(\tau)Y_{910}(\tau)) + \tilde{P}_{13}(\tau)P_{1311}\omega_{1311}(t') \times \\
 &\times (1-\tilde{P}_{13}(\tau)Y_{1314}(\tau))] (1-\tilde{P}_{11}(\tau)Y_{112}(\tau))(1-\tilde{P}_{11}(\tau)Y_{1112}(\tau))(1-\tilde{P}_{11}(\tau)Y_{1113}(\tau)) d\tau; \\
 \tilde{P}_{12}(t) &= P_{12}\delta(t) + \int_0^t [\tilde{P}_{10}(\tau)P_{1012}\omega_{1012}(t') (1-\tilde{P}_{10}(\tau)Y_{102}(\tau))(1-\tilde{P}_{10}(\tau)Y_{1013}(\tau)) + \\
 &+ \tilde{P}_{11}(\tau)P_{1112}\omega_{1112}(t') (1-\tilde{P}_{11}(\tau)Y_{112}(\tau))] \times \\
 &\times (1-\tilde{P}_{12}(\tau)Y_{1210}(\tau))(1-\tilde{P}_{12}(\tau)Y_{1214}(\tau)) d\tau; \\
 \tilde{P}_{13}(t) &= P_{13}\delta(t) + \int_0^t [\tilde{P}_{11}(\tau)P_{1113}\omega_{1113}(t') (1-\tilde{P}_{11}(\tau)Y_{112}(\tau)) \times \\
 &\times (1-\tilde{P}_{11}(\tau)Y_{1112}(\tau)) + \tilde{P}_{10}(\tau)P_{1013}\omega_{1013}(t') (1-\tilde{P}_{10}(\tau)Y_{102}(\tau)) \times \\
 &\times (1-\tilde{P}_{11}(\tau)Y_{1113}(\tau))] \times (1-\tilde{P}_{13}(\tau)Y_{1311}(\tau))(1-\tilde{P}_{13}(\tau)Y_{1314}(\tau)) d\tau; \\
 \tilde{P}_{14}(t) &= P_{14}\delta(t) + \int_0^t [\tilde{P}_{12}(\tau)P_{1214}\omega_{1214}(t') (1-\tilde{P}_{12}(\tau)Y_{1210}(\tau)) + \\
 &+ \tilde{P}_{13}(\tau)P_{1314}\omega_{1314}(t') (1-\tilde{P}_{13}(\tau)Y_{1311}(\tau))] d\tau,
 \end{aligned} \tag{4}$$

где $\omega_{ij}(t') = \omega_{ij}(t-\tau)$; $Y_{ij}(\tau) = P_{ij}\Omega_{ij}(\tau)$; P_j – начальные значения вероятностей нахождения систем в j -м состоянии ($j=1\dots 14$); $\delta(t)$ – дельта функция; $\Omega_{ij}(\tau) = \int_0^\tau \omega_{ij}(u)du$ – функция распределения времени пребывания системы в состоянии i до перехода в состояние j .

Система уравнений (4) является обобщенным аналитическим описанием модели конфликтного взаимодействия ОЭС–ЛК, позволяющим определять вероятность выигрыша в конфликте той или иной стороной.

Применяя преобразования Лапласа к выражениям (4), получим систему уравнений для интервально-переходных вероятностей функционирования сторон:

$$\begin{aligned}
 \tilde{P}_1(s) &= P_1 - \tilde{P}_2(s) - \tilde{P}_3(s) - \tilde{P}_4(s) - \tilde{P}_5(s) - \tilde{P}_6(s) - \tilde{P}_7(s) - \tilde{P}_8(s) - \tilde{P}_9(s) - \tilde{P}_{10}(s) - \\
 &\quad - \tilde{P}_{11}(s) - \tilde{P}_{12}(s) - \tilde{P}_{13}(s) - \tilde{P}_{14}(s); \\
 \tilde{P}_2(s) &= P_2 + [\tilde{P}_1(s)P_{12}\omega_{12}(s) + \tilde{P}_3(s)P_{32}\omega_{32}(s)(1 - \tilde{P}_3(s)P_{35}\Omega_{35}(s)) \times \\
 &\quad \times (1 - \tilde{P}_3(s)P_{36}\Omega_{36}(s)) + \tilde{P}_4(s)P_{42}\omega_{42}(s)(1 - \tilde{P}_4(s)P_{45}\Omega_{45}(s))(1 - \tilde{P}_4(s)P_{46}\Omega_{46}(s)) + \\
 &\quad + \tilde{P}_5(s)P_{52}\omega_{52}(s)(1 - \tilde{P}_5(s)P_{57}\Omega_{57}(s))(1 - \tilde{P}_5(s)P_{58}\Omega_{58}(s)) + \tilde{P}_6(s)P_{62}\omega_{62}(s) \times \\
 &\quad \times (1 - \tilde{P}_6(s)P_{67}\Omega_{67}(s))(1 - \tilde{P}_6(s)P_{68}\Omega_{68}(s)) + \tilde{P}_7(s)P_{72}\omega_{72}(s)(1 - \tilde{P}_7(s)P_{79}\Omega_{79}(s)) + \\
 &\quad + \tilde{P}_8(s)P_{82}\omega_{82}(s)(1 - \tilde{P}_8(\tau)P_{89}\Omega_{89}(s))(1 - \tilde{P}_9(s)P_{910}\Omega_{910}(s))(1 - \tilde{P}_9(s)P_{911}\Omega_{911}(s)) + \\
 &\quad + \tilde{P}_{10}(s)P_{102}\omega_{102}(s)(1 - \tilde{P}_{10}(s)P_{1011}\Omega_{1011}(s))(1 - \tilde{P}_{10}(s)P_{1012}\Omega_{1012}(s))] \times \\
 &\quad \times (1 - \tilde{P}_2(s)P_{23}\Omega_{23}(s))(1 - \tilde{P}_2(s)P_{24}\Omega_{24}(s)); \\
 \tilde{P}_3(s) &= P_3 + P_{23}\tilde{P}_2(\tau)\omega_{23}(s)(1 - \tilde{P}_2(s)P_{24}\Omega_{24}(s))(1 - \tilde{P}_3(s)P_{32}\Omega_{32}(s)) \times \\
 &\quad \times (1 - \tilde{P}_3(s)P_{35}\Omega_{35}(s))(1 - \tilde{P}_3(s)P_{36}\Omega_{36}(s)); \\
 \tilde{P}_4(s) &= P_4 + P_{24}\tilde{P}_2(s)\omega_{24}(s)(1 - \tilde{P}_2(s)P_{23}\Omega_{23}(s))(1 - P_{42}\tilde{P}_4(s)\Omega_{42}(s)) \times \\
 &\quad \times (1 - \tilde{P}_4(s)P_{45}\Omega_{45}(s))(1 - P_{46}\tilde{P}_4(s)\Omega_{46}(s)); \\
 \tilde{P}_5(s) &= P_5 + [\tilde{P}_3(s)P_{35}\omega_{35}(s)(1 - \tilde{P}_3(s)P_{32}\Omega_{32}(s))(1 - \tilde{P}_3(s)P_{36}\Omega_{36}(s)) + \\
 &\quad + \tilde{P}_4(s)P_{45}\omega_{45}(s)(1 - \tilde{P}_4(s)P_{42}\Omega_{42}(s))(1 - \tilde{P}_4(s)P_{46}\Omega_{46}(s))] (1 - \tilde{P}_5(s)P_{52}\Omega_{52}(s)) \times \\
 &\quad \times (1 - \tilde{P}_5(s)P_{57}\Omega_{57}(s))(1 - \tilde{P}_5(s)P_{58}\Omega_{58}(s)); \\
 \tilde{P}_6(s) &= P_6 + [\tilde{P}_3(s)P_{36}\omega_{36}(s)(1 - \tilde{P}_3(s)P_{32}\Omega_{32}(s))(1 - \tilde{P}_3(s)P_{35}\Omega_{35}(s)) + \tilde{P}_4(s)P_{46}\omega_{46}(s) \times \\
 &\quad \times (1 - \tilde{P}_4(s)P_{42}\Omega_{42}(s))(1 - \tilde{P}_4(s)P_{45}\Omega_{45}(s))] \times \\
 &\quad \times (1 - \tilde{P}_6(s)P_{62}\Omega_{62}(s))(1 - \tilde{P}_6(s)P_{67}\Omega_{67}(s))(1 - \tilde{P}_6(s)P_{68}\Omega_{68}(s)); \\
 \tilde{P}_7(s) &= P_7 + [\tilde{P}_5(s)P_{57}\omega_{57}(s)(1 - \tilde{P}_5(s)P_{52}\Omega_{52}(s))(1 - \tilde{P}_5(s)P_{58}\Omega_{58}(s)) + \\
 &\quad + \tilde{P}_6(s)P_{67}\omega_{67}(s)(1 - \tilde{P}_6(s)P_{62}\Omega_{62}(s))(1 - \tilde{P}_6(s)P_{68}\Omega_{68}(s))] \times \\
 &\quad \times (1 - \tilde{P}_7(s)P_{72}\Omega_{72}(s))(1 - \tilde{P}_7(s)P_{79}\Omega_{79}(s)); \\
 \tilde{P}_8(s) &= P_8 + [\tilde{P}_6(s)P_{68}\omega_{68}(s)(1 - \tilde{P}_6(s)P_{62}\Omega_{62}(s))(1 - P_{67}\tilde{P}_6(s)\Omega_{67}(s)) + \\
 &\quad + \tilde{P}_5(s)P_{58}\omega_{58}(s)(1 - \tilde{P}_5(s)P_{52}\Omega_{52}(s))(1 - \tilde{P}_5(s)P_{57}\Omega_{57}(s))] \times \\
 &\quad \times (1 - \tilde{P}_8(s)P_{89}\Omega_{89}(s))(1 - \tilde{P}_8(s)P_{82}\Omega_{82}(s)); \\
 \tilde{P}_9(s) &= P_9 + [\tilde{P}_7(s)P_{79}\omega_{79}(s)(1 - \tilde{P}_7(s)P_{72}\Omega_{72}(s)) + \tilde{P}_8(s)P_{89}\omega_{89}(s)(1 - \tilde{P}_8(s)P_{82}\Omega_{82}(s))] \times \\
 &\quad \times (1 - \tilde{P}_9(s)P_{910}\Omega_{910}(\tau))(1 - \tilde{P}_9(\tau)P_{911}\Omega_{911}(s)); \\
 \tilde{P}_{10}(s) &= P_{10} + \tilde{P}_9(s)P_{910}\omega_{910}(s)(1 - P_{911}\tilde{P}_9(s)\Omega_{911}(s)) + \\
 &\quad + \tilde{P}_{12}(s)P_{1210}\omega_{1210}(s)(1 - \tilde{P}_{12}(s)P_{1214}\Omega_{1214}(s)) \times \\
 &\quad \times (1 - \tilde{P}_{10}(s)P_{102}\Omega_{102}(s))(1 - \tilde{P}_{10}(s)P_{1012}\Omega_{1012}(s))(1 - \tilde{P}_{10}(s)P_{1013}\Omega_{1013}(s));
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \tilde{P}_{11}(s) &= P_{11} + \tilde{P}_9(s)P_{911}\omega_{911}(s)(1 - P_{910}\tilde{P}_9(s)\Omega_{910}(s)) + \\ &+ \tilde{P}_{13}(s)P_{1311}\omega_{1311}(s)(1 - \tilde{P}_{13}(s)P_{1314}\Omega_{1314}(s))] \times \\ &\times (1 - \tilde{P}_{11}(s)P_{112}\Omega_{112}(s))(1 - \tilde{P}_{11}(s)P_{1112}\Omega_{1112}(s))(1 - \tilde{P}_{11}(s)P_{1113}\Omega_{1113}(s)); \\ \tilde{P}_{12}(s) &= P_{12} + [\tilde{P}_{10}(s)P_{1012}\omega_{1012}(s)(1 - \tilde{P}_{10}(s)P_{102}\Omega_{102}(s))(1 - \tilde{P}_{10}(s)P_{1013}\Omega_{1013}(s)) + \\ &+ \tilde{P}_{11}(s)P_{1112}\omega_{1112}(s)(1 - \tilde{P}_{11}(s)P_{112}\Omega_{112}(s))(1 - \tilde{P}_{11}(s)P_{1113}\Omega_{1113}(s))] \times \\ &\times (1 - \tilde{P}_{12}(s)P_{1210}\Omega_{1210}(s))(1 - \tilde{P}_{12}(s)P_{1214}\Omega_{1214}(s)); \\ \tilde{P}_{13}(s) &= P_{13} + [\tilde{P}_{11}(s)P_{1113}\omega_{1113}(s)(1 - \tilde{P}_{11}(s)P_{112}\Omega_{112}(s))(1 - \tilde{P}_{11}(s)P_{1112}\Omega_{1112}(s)) + \\ &+ \tilde{P}_{10}(s)P_{1013}\omega_{1013}(s)(1 - \tilde{P}_{10}(s)P_{102}\Omega_{102}(s))(1 - \tilde{P}_{10}(s)P_{1012}\Omega_{1012}(s))] \times \\ &\times (1 - \tilde{P}_{13}(s)P_{1311}\Omega_{1311}(s))(1 - \tilde{P}_{13}(s)P_{1314}\Omega_{1314}(s)); \\ \tilde{P}_{14}(s) &= P_{14} + \tilde{P}_{12}(s)P_{1214}\omega_{1214}(s) + \tilde{P}_{13}(s)P_{1314}\omega_{1314}(s). \end{aligned}$$

Оценка вероятности пропуска цели ЛК (показатель эффективности выигрыша ОЭС в информационном конфликте с ЛК) P_{np} в зависимости от времени нахождения БЛА в зоне действия ЛК t найдем решив систему уравнений (5) при начальных условиях $P_1 = 1, P_k = 0, (k = 2...14)$, применив обратное преобразование Лапласа к $\tilde{P}_{14}(s)$ в виде:

$$P_b(t) = L_s^{-1} \left(\frac{1}{s} \tilde{P}_{14}(s) \right). \quad (6)$$

Распределение времени выполнения задач сторонами конфликта аппроксимируем показательным законом распределения [11]: $\omega_{ij}(\tau) = \lambda_i \exp(-\lambda_i \tau)$, где: $\lambda_i = 1/t_{cpi}, t_{cpi}$ – среднее время нахождения ОЭС или ЛК в i -ом состоянии. Найдем аналитические выражения для оценки вероятности выигрыша ОЭС в конфликте с ЛК в заданные моменты времени в зависимости от вероятностных характеристик сторон для показательного закона распределения. Исходя из временных характеристик состояний из таблицы 1 запишем выражения для соответствующих безусловных плотностей вероятностей:

$$\begin{aligned} \omega_{12}(\tau) &= \frac{1}{t_k} \exp\left(-\frac{\tau}{t_k}\right), \omega_{23}(\tau) = \frac{1}{t_h} \exp\left(-\frac{\tau}{t_h}\right), \omega_{24}(\tau) = \frac{1}{t_{PH}} \exp\left(-\frac{\tau}{t_{PH}}\right), \\ \omega_{32}(\tau) &= \omega_{35}(\tau) = \omega_{45}(\tau) = \omega_{46}(\tau) = \frac{1}{t_{o1}} \exp\left(-\frac{\tau}{t_{o1}}\right), \omega_{42}(\tau) = \frac{1}{t_{3OK}} \exp\left(-\frac{\tau}{t_{3OK}}\right), \\ \omega_{36}(\tau) &= \omega_{58}(\tau) = \omega_{710}(\tau) = \frac{1}{t_{III}} \exp\left(-\frac{\tau}{t_{III}}\right), \\ \omega_{52}(\tau) &= \omega_{57}(\tau) = \omega_{67}(\tau) = \omega_{68}(\tau) = \frac{1}{t_{o3}} \exp\left(-\frac{\tau}{t_{o3}}\right), \omega_{62}(\tau) = \frac{1}{t_{3O}} \exp\left(-\frac{\tau}{t_{3O}}\right), \\ \omega_{72}(\tau) &= \omega_{79}(\tau) = \omega_{89}(\tau) = \omega_{910}(\tau) = \omega_{911}(\tau) = \frac{1}{t_p} \exp\left(-\frac{\tau}{t_p}\right), \omega_{82}(\tau) = \frac{1}{t_{3P}} \exp\left(-\frac{\tau}{t_{3P}}\right), \\ \omega_{102}(\tau) &= \omega_{1012}(\tau) = \omega_{1112}(\tau) = \omega_{1113}(\tau) = \frac{1}{t_H} \exp\left(-\frac{\tau}{t_H}\right), \omega_{112}(\tau) = \frac{1}{t_{3H}} \exp\left(-\frac{\tau}{t_{3H}}\right), \\ \omega_{1210}(\tau) &= \omega_{1214}(\tau) = \omega_{1314}(\tau) = \frac{1}{t_{POP}} \exp\left(-\frac{\tau}{t_{POP}}\right), \omega_{1311}(\tau) = \frac{1}{t_{3II}} \exp\left(-\frac{\tau}{t_{3II}}\right). \end{aligned} \quad (7)$$

Подставляя (7) в (5) при начальных условиях $P_k = 0$ ($k = 2...14$) получим систему уравнений, которая с системных позиций описывает конфликтное взаимодействие ОЭС–ЛК [12]. В рамках этого подхода по аналогии с [8] конфликт ОЭС–ЛК представляется 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. Исходные данные для моделирования, характеризующие временные параметры конфликта, а также пространственно-энергетические, динамические и дифракционные параметры систем представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры ЛСР, ОЭС и условий их функционирования

Параметры ЛСР	
Длина волны зондирующего излучения, м	$1,06 \cdot 10^{-6}$
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	$4 \cdot 10^{-7} \dots 7 \cdot 10^{-7}$
Угол поля зрения приемника, рад	0,006
Параметры трассы распространения излучения	
Длина трассы, м	$10^3; 3 \cdot 10^3$
Метеорологическая дальность видимости, м	$\geq 10^4$
Интенсивность турбулентных флуктуаций воздуха, $m^{-2/3}$	$10^{-13}; 10^{-16}$
Параметры МЛИ	
Мощность МЛИ	10^8
Длительность импульса, с	$3 \cdot 10^{-3}$
Длина волны, м	$1,06 \cdot 10^{-6}$
Частота повторения импульсов, Гц	10

Вероятность обнаружения P_{o1} и время обнаружения t_{o1} ЛСР отраженного от ОЭС сигнала для различных видов поиска определялись на основе модели ОЭС как объекта разведки в соответствии с методикой, изложенной в [9]. Вероятность P_{o3} определялась исходя из логики – обнаружение не менее 3 отраженных от ОЭС сигналов из 5 излученных зондирующих импульсов. Вероятность

превышения МЛИ, необходимого для вывода из строя ОЭС определялась в [13]. Вероятности $P_{ЦВ}$, $P_{ПШ}$ приняты равными 1, а $P_P = 0,9$.

Временные характеристики конфликта задавались следующими: $t_k = 0,001$ с; $t_{нл} = 0,003$ с; $t_{о3} = 4t_{о1}$; $t_{PII} = t_{нл} + 0,1t_{о1}$; $t_{ПШ} = t_{нл} + 0,1t_{о1}$; $t_P = t_{о3}$; $t_{3OK} = t_{3P} = t_{нл}$; $t_{3O} = 0,1t_{нл}$; $t_n = t_{3H} = t_{нл} / 100$; $t_n = t_{3П} = 0,002$ с.

Анализ зависимости вероятности выигрыша ОЭС БЛА в конфликте с ЛСР от параметров сторон

При моделировании принималось, что выигрыш ОЭС БЛА в конфликте с ЛСР определяется вероятностью пропуска ОЭС лазерной станцией разведки. Данный показатель характеризует эффективность скрытия ОЭС от ЛСР и может быть найден по формуле:

$$P_B = 1 - \tilde{P}_9(t). \quad (8)$$

Так же 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. 1-6.

На рис. 3 представлены результаты оценки вероятности пропуска цели ЛСР P_B в зависимости от времени нахождения ОЭС в зоне обнаружения ЛСР t' (t' – время, нормированное на длительность цикла защиты ОЭС от ЛСР) для различных видов поиска, реализуемых ЛСР [14].



Рис. 3. Зависимости вероятности пропуска цели ЛСР от t' для: 1, 2 – одноэтапного поиска; 3, 4 – двухэтапного поиска; 5, 6 – комбинированного поиска; 2, 4, 6 – быстродействие ОЭС увеличено в два раза

Из приведенных зависимостей видно, что вероятность выигрыша ОЭС в конфликте с увеличением времени нахождения в зоне обнаружения ЛСР снижается. Однако в дальнейшем происходит повышение вероятности выигрыша с увеличением времени нахождения ОЭС в зоне обнаружения ЛСР. Это связано с повышением эффективности защиты ОЭС в результате последовательного наращивания усилий по своей защите. Данный результат обуславливает необходимость проведения защитных мероприятий сразу же с момента возникновения конфликта. Наряду с отмеченным из полученных зависимостей следует 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 [15]. Последняя задача связана со снижением заметности объектов – носителей ОЭС. Применительно к радиолокационному и оптическому диапазону в настоящее время имеется значительный прогресс в ее решении [16]. Поэтому в данной работе рассматривается вопрос повышения скрытности функционирования самого ОЭС. Одним из подходов к этому может быть упреждающее обнаружение факта разведки ОЭС ЛСР, например, по рассеянному атмосферой излучению [17]. Последнее позволяет установить факт разведки, определить направление на средство разведки [18] 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 P_B ОЭС в конфликте и информативности изображения наблюдаемой сцены H от площади приемной апертуры ОЭС S'_{an} , нормированной на площадь излучающей апертуры ЛСР (рис. 4) [19].

Исследования выполнялись при различных вероятностях правильного обнаружения рассеянного атмосферой излучения ЛСР P_D , величина которых рассчитывалась по методике, изложенной в [20]. Полученные зависимости показывают, что с увеличением площади приемной апертуры ОЭС, уменьшается вероятность P_B (зависимости 1–6), что связано с увеличением мощности отраженного от ОЭС зондирующего сигнала ЛСР. В противовес этому с увеличением вероятности P_D , вероятность выигрыша ОЭС в конфликте с ЛСР увеличивается (зависимости 1, 3, 5 по сравнению с 2, 4, 6). 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. 4, зависимость 7). Это позволяет определить величину S'_{an} , удовлетворяющую требованиям по информативности изображения и разведзащищенности ОЭС.

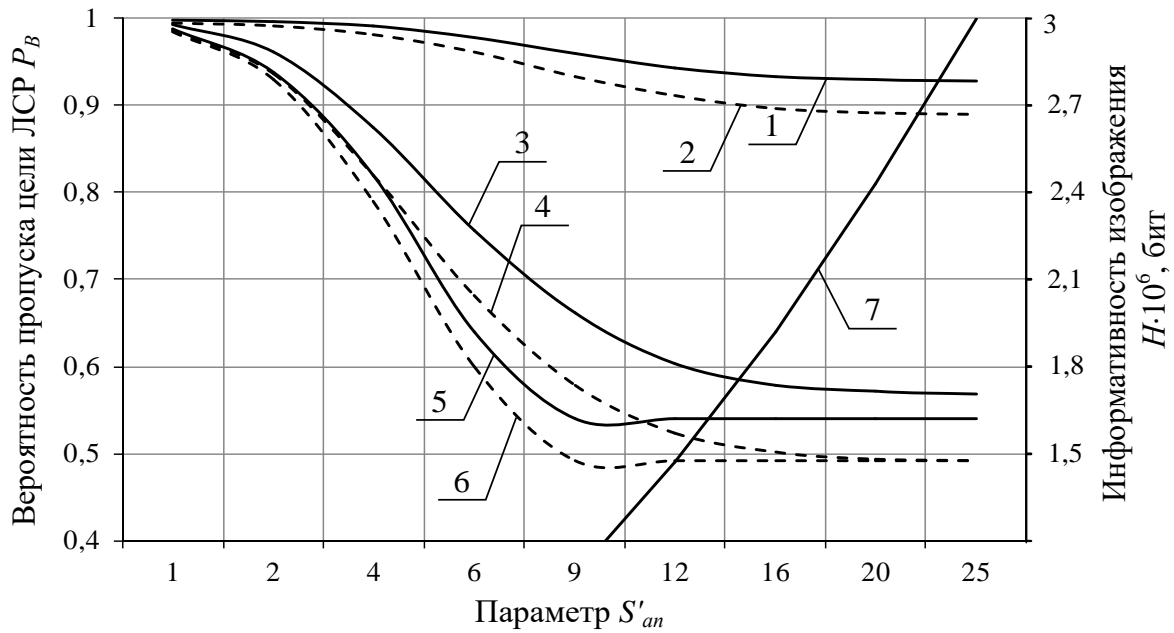


Рис. 4. Зависимости вероятности пропуска цели ЛСР и информативности формируемого ОЭС изображения от S'_{an} для: 1, 2 – одноэтапного поиска; 3, 4 – двухэтапного поиска; 5, 6 – комбинированного поиска; 1, 3, 5 линии – $P_D = 0,6$; 2, 4, 6 линии – $P_D = 0,5$; 7 линия – $H(S'_{an})$

На рис. 5 представлены зависимости вероятности выигрыша ОЭС P_B в конфликте с ЛСР от коэффициента отражения приемной матрицы ОЭС $K_{отр}$ для различных видов поиска.

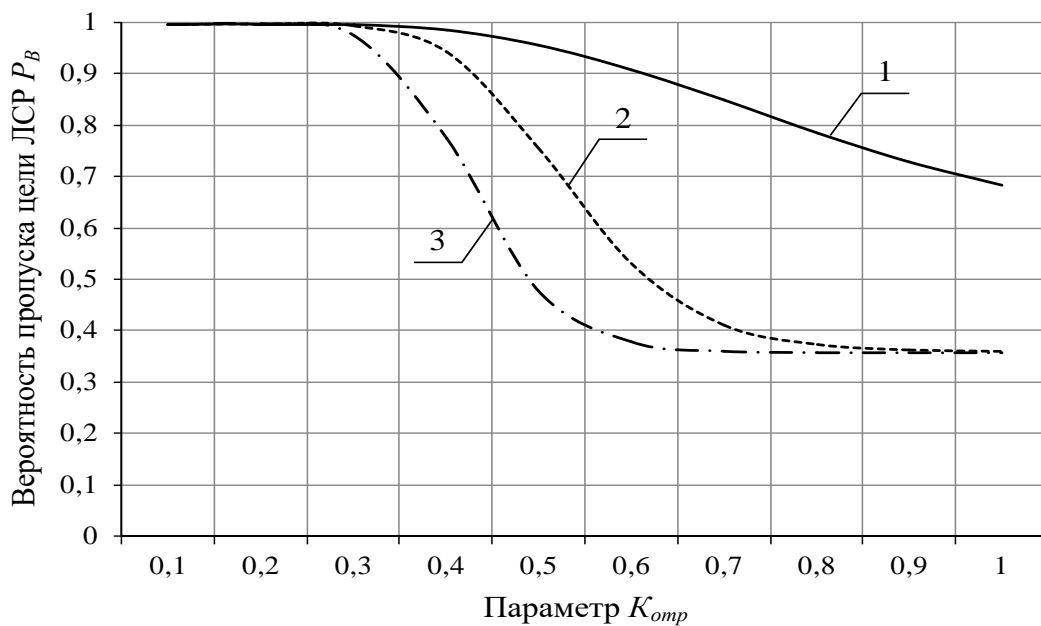


Рис. 5. Зависимости вероятности пропуска цели ЛСР от $K_{отр}$ для: 1 – одноэтапного поиска; 2 – двухэтапного поиска; 3 – комбинированного поиска

Из приведённых зависимостей видно, что с увеличением коэффициента отражения $K_{отр}$ приемника излучения вероятность P_B убывает. Это происходит вследствие увеличения заметности ОЭС из-за повышения отношения сигнал-шум на фотоприемнике ЛСР. Поэтому для повышения разведзащищенности ОЭС в конфликте следует уменьшать отражательные характеристики его приемника излучения, которые должны быть тем меньше, чем выше техническая оснащенность системы разведки противника.

На рис. 6 представлены зависимости вероятности P_B от мощности зондирующего сигнала ЛСР P_{zc}' для различных видов поиска (P_{zc}' – мощность зондирующего сигнала, нормированная на пороговую чувствительность приемника излучения). Установлено, что при $P_{zc}' < (0,2..0,4)10^{16}$ Вт вероятность P_B уменьшается с увеличением мощности зондирующего сигнала. Как и в предыдущем случае (рис. 5), это происходит вследствие увеличения отношения сигнал-шум q_0 на фотоприемнике ЛСР. Дальнейшее увеличение P_{zc}' ведет к существенному увеличению мощности рассеянного атмосферой лазерного излучения, что, в свою очередь, вызывает повышение вероятности обнаружения ЛСР. Поэтому вероятность выигрыша ОЭС в конфликте начинает расти.

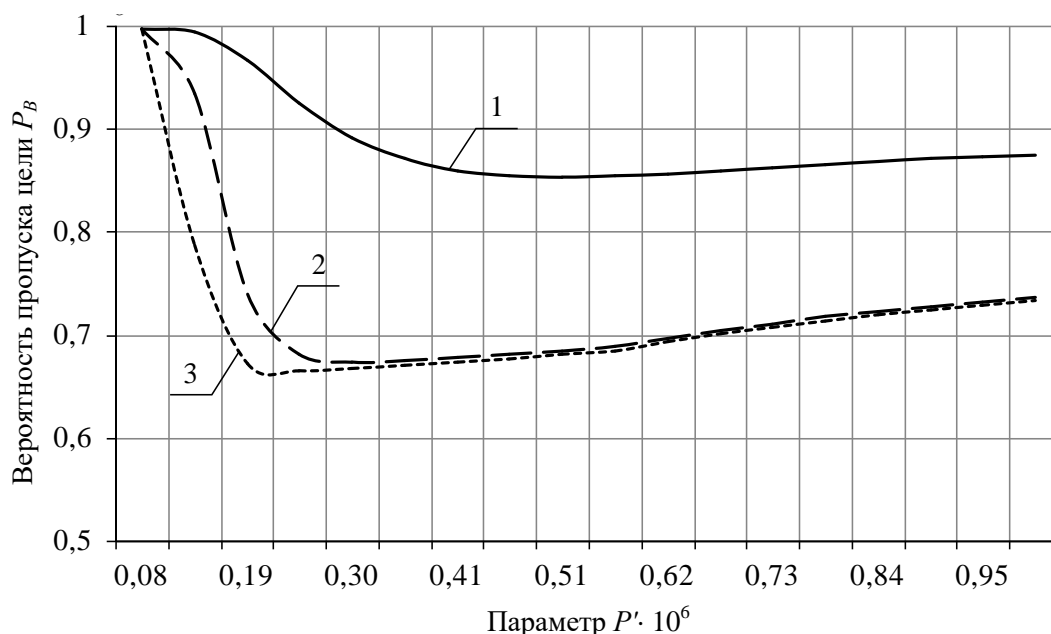


Рис. 6. Зависимости вероятности пропуска цели ЛСР от P' для: 1 – одноэтапного поиска; 2 – двухэтапного поиска; 3 – комбинированного поиска

На рис. 7 представлены зависимости вероятности выигрыша ОЭС P_B в конфликте от отношения радиуса пространственной когерентности зондирующего излучения ЛСР к радиусу его апертуры R' для различных видов поиска. Сплошные кривые соответствуют интенсивности турбулентных флуктуаций диэлектрической проницаемости воздуха C_ϵ^2 равной $10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$, а пунктирные $10^{-17} \text{ м}^{-2/3}$.

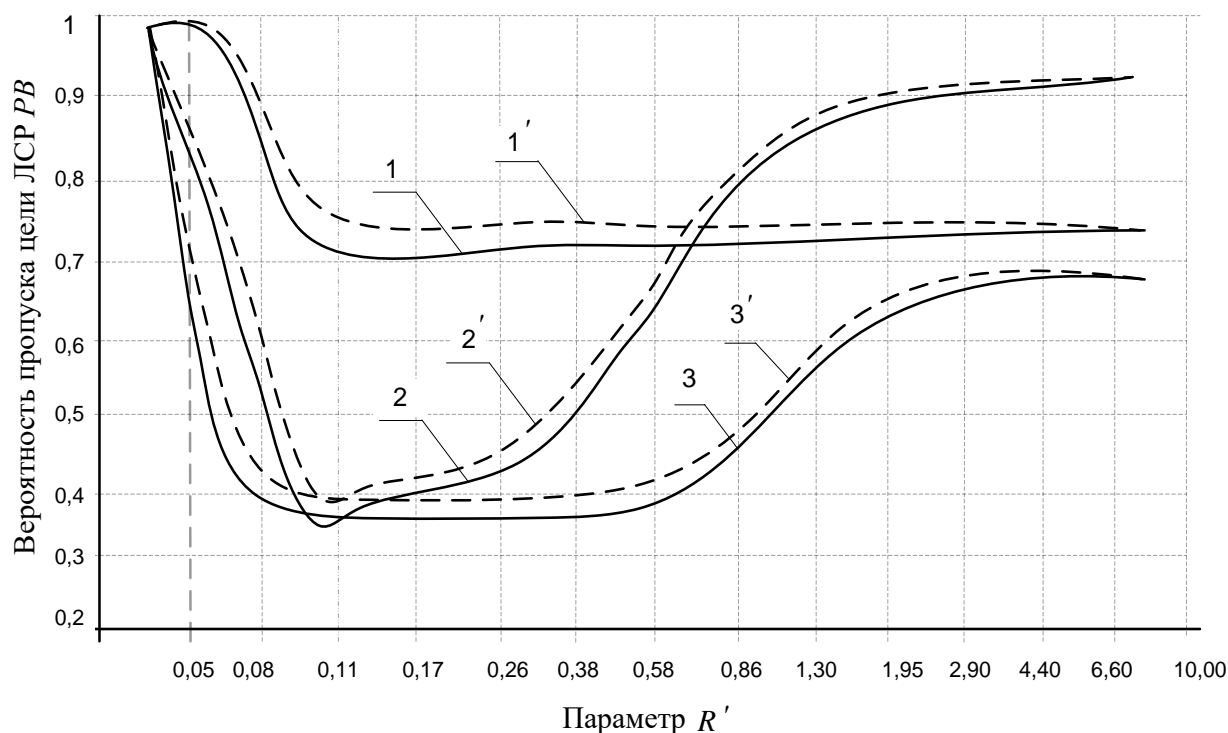


Рис. 7. Зависимости вероятности пропуска цели ЛСР от R' для: 1 – одноэтапного поиска; 2 – двухэтапного поиска; 3 – комбинированного поиска

Из представленных результатов видно, что зависимости $P_B = f(R')$ 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_B 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_B . В полученных результатах интересной является зависимость величины P_B от интенсивности турбулентных флуктуаций диэлектрической проницаемости воздуха C_n^2 . Оказывается, с ростом величины C_n^2 вероятность выигрыша ОЭС в конфликте с ЛСР уменьшается. Данный результат связан с эффектом усиления отраженного от ОЭС сигнала ЛСР [21]. Он заключается в том, что прямое и отраженное излучение ЛСР при распространении в турбулентной атмосфере проходят по одним и тем же неоднородностям воздуха. В результате этого происходит «стирание» влияния атмосферной турбулентности на отраженный сигнал и его интенсивность воз-

растает. Расчетами установлено, что при этом увеличивается дальность обнаружения ОЭС ЛСР. Данное приращение, в зависимости от параметров сторон, может превышать 11%. Вместе с тем, условия возникновения этого эффекта являются очень жесткими [22], что делает маловероятным возможность его использования при локации ОЭС.

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_B 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. 8.

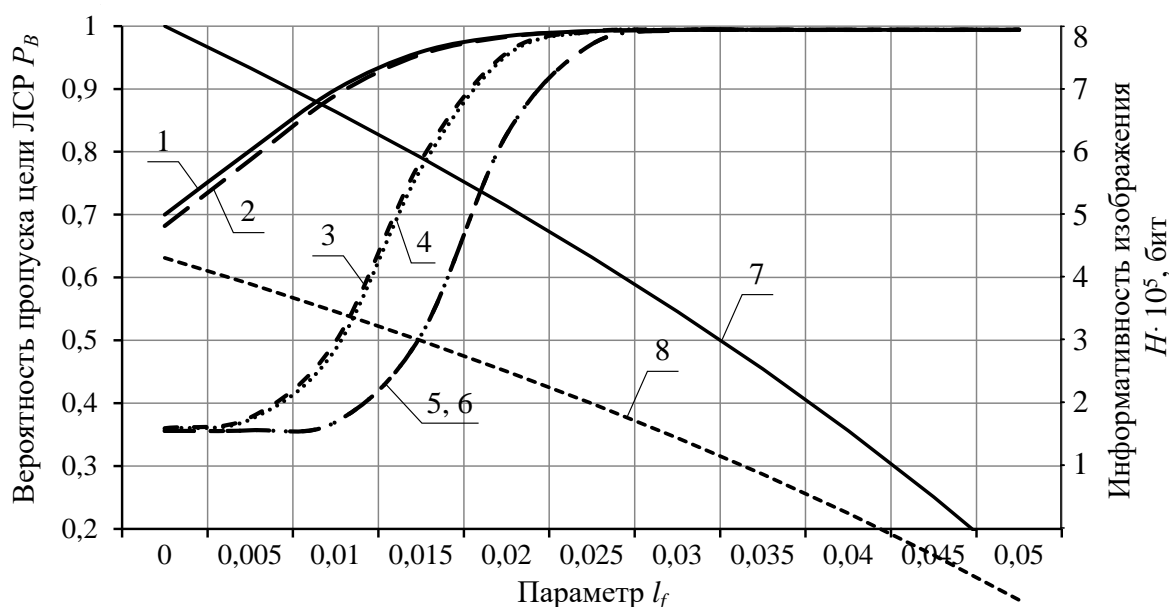


Рис. 8. Зависимости вероятности пропуска цели ЛСР и информативности формируемого ОЭС изображения от l_f для: 1, 2 – одноэтапного поиска; 3, 4 – двухэтапного поиска; 5, 6 – комбинированного поиска; 1, 3, 5, 7 линии $R_{an}=5$; 2, 4, 6, 8 линии $R_{an}=10$; 7, 8 линии $H(l_f)$

Степень расфокусировки определялась выражением:

$$l_f = \frac{f-l}{f}, \tag{8}$$

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

Из рис. 8 видно, что при увеличении l_f , вероятность выигрыша ОЭС в конфликте возрастает (зависимости 1-6). Причем, чем меньше радиус приемной апертуры ОЭС R_{an} , тем выше вероятность выигрыша P_B . Это связано со снижением заметности ОЭС вследствие уменьшения отношения сигнал-шум на

приемнике излучения ЛСР. Также из рис. 8 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 разведзащищенности.

Таким образом, в ходе исследований вероятности выигрыша ОЭС БЛА в конфликте с ЛСР в зависимости от параметров конфликтующих сторон и условий их функционирования выявлены основные закономерности, позволяющие обосновано выбирать параметры ОЭС, обеспечивающие эффективное выполнение целевых задач при максимальном выигрыше в конфликте.

Анализ зависимости вероятности выигрыша ОЭС БЛА в конфликте с ЛК от параметров сторон

Исследования эффективности защиты ОЭС от ЛК были проведены также с использованием модели процесса конфликтного взаимодействия системы ОЭС–ЛК, описанной выше. Исходные данные, при которых проводились исследования, представлены в таблице 2. Полученные результаты исследования представлены на рис. 9, 10, 11.

Проанализируем поведение вероятности поражения ОЭС P_n и вероятности пропуска ЛК P_{np} в конфликте с ОЭС в зависимости от параметров МЛИ, приемного канала ОЭС, интенсивности турбулентности атмосферы и числовых характеристик ошибки наведения. Эти зависимости представлены на рис. 9, 10, они получены при дальностях до цели 1000 и 3500 м.

Зависимости, представленные на рис. 9, получены для дистанции взаимодействия 1000 м. Они показывают, что при $m/a \neq 0$ с ростом флуктуационной ошибки наведения, характеризуемой σ/a , снижается вероятность пропуска ОЭС ЛК. Это объясняется тем, что при $m/a \neq 0$, увеличение флуктуационной составляющей ошибки наведения эквивалентно увеличению расходимости поражающего излучения и при $m/a \neq 0$ существует оптимальная ширина его диаграммы, при которой происходит максимизация вероятности поражения ОЭС и вероятность их пропуска ЛК снижается. Этим же объясняется повышение вероятности поражения ОЭС в условиях сильной атмосферной турбулентности, которая также расфокусирует лазерный пучок и нивелирует влияние систематической ошибки наведения.

Дальнейшее увеличение флуктуационной ошибки ведет к резкому увеличению вероятности пропуска цели за счет ослабления плотности поражающей энергии на ОЭС. В целом, полученные результаты свидетельствуют о том, что учет ошибок наведения лазерного излучения на ОЭС является значимым при анализе результатов взаимодействия ОЭС и ЛК.

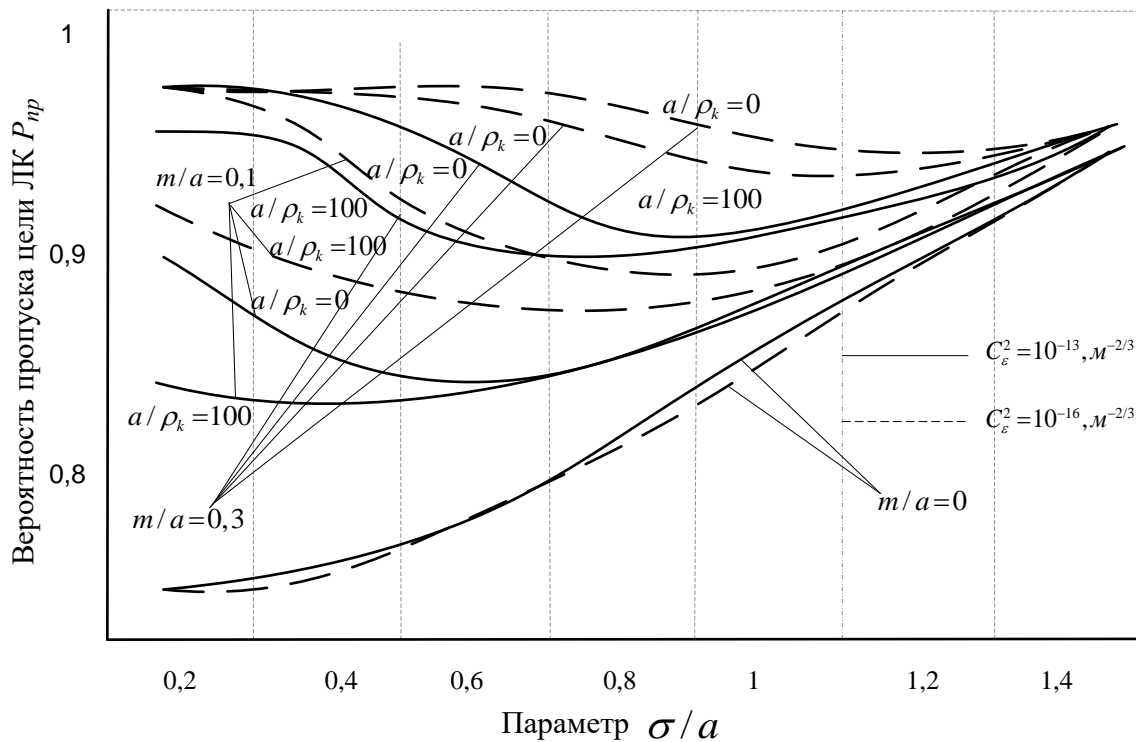


Рис. 9. Зависимость вероятности пропуска ЛК ОЭС от дисперсии ошибки наведения σ/a при $L=1000$ м; $a/\rho_k=0;100$ и $m/a=0; 0,1; 0,3$

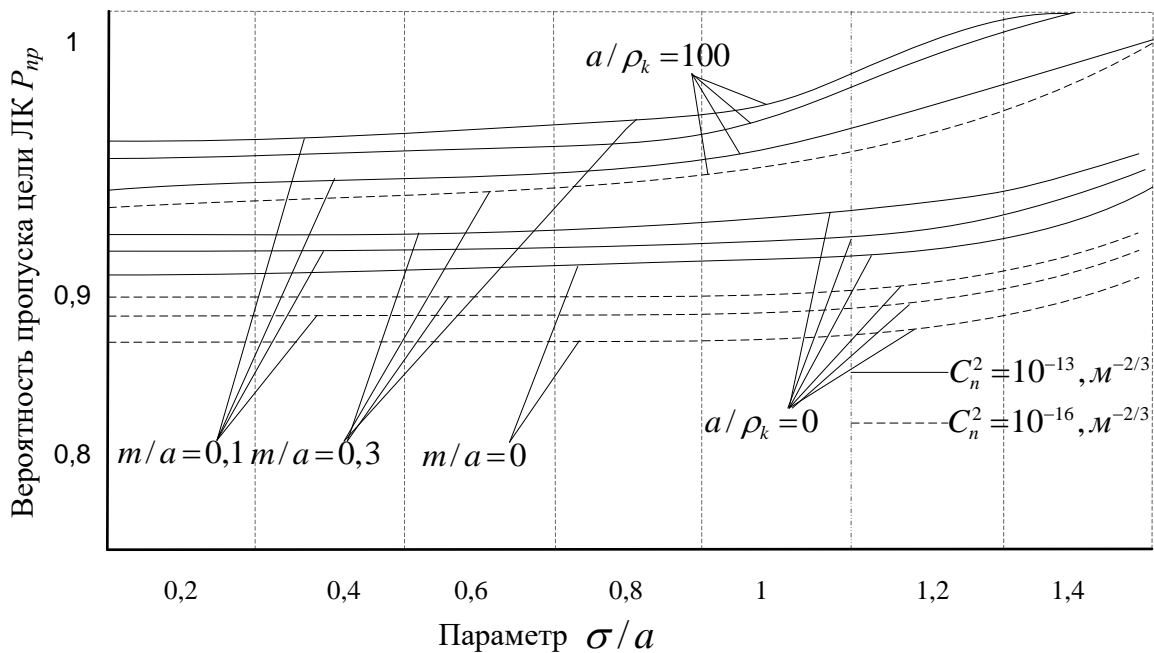


Рис. 10. Зависимость вероятности пропуска цели от дисперсии ошибки наведения σ/a при $L=3000$ м, $a/\rho_k=0;100$ и $m/a=0; 0,1; 0,3$

Если рассмотреть ту же зависимость при дальности 3500 м (рис. 10), то заметим, что в отличие от рис. 9 увеличение флуктуационной составляющей ошибки наведения МЛИ приводит к увеличению вероятности пропуска $P_{пр}$ цели ЛК, что связано с уменьшением плотности поражающей энергии на послед-

ней. Необходимо обратить внимание на то, что в отличие от результата, отраженного на рис. 9, увеличение интенсивности турбулентных флуктуаций диэлектрической проницаемости воздуха на трассе распространения МЛИ приводит к увеличению вероятности пропуска ОЭС ЛК. Это по-видимому вызвано тем, что при увеличении дистанции поражения накопленные во время распространения МЛИ к ОЭС деформации волнового фронта, вызванные атмосферной турбулентностью и ошибками наведения, в более сильной степени переходят в амплитудные искажения и более значительно чем при меньшей дистанции проявляются в уменьшении плотности поражающей энергии на ОЭС.

В приведенных графиках обращает на себя зависимость вероятности пропуска ОЭС ЛК от когерентных свойств МЛИ.

Она состоит в том, что с ростом пространственной когерентности МЛИ вероятность пропуска ОЭС снижается и тем значительнее, чем меньше ошибки наведения излучения. Объяснение этому простое. С увеличением ρ_k уменьшается его расходимость и, как следствие, возрастает плотность энергии МЛИ в плоскости ОЭС, что приводит к снижению вероятности пропуска ОЭС.

Далее, рассмотрим зависимости вероятности пропуска ОЭС ЛК от времени его работы нормированного на время нахождения ОЭС в зоне его поражения. Графики этих зависимостей при различных вероятностях защиты ОЭС на этапах конфликтного взаимодействия представлены на рис. 11. Приведенные зависимости показывают, что проигрыш ЛК в конфликте с ОЭС тем вероятнее, чем больше вероятности выигрыша ОЭС на этапах защиты от разведки $P_{зр}$ и поражения $P_{зл}$. Это объясняется уменьшением ресурса времени, которое может быть использовано ЛК для поражения ОЭС вследствие чего эффективность комплекса снижается.

Представленные на рис. 11 результаты, отражают еще один очевидный факт, заключающийся в том, что для выигрыша ОЭС в конфликте с ЛК защитные мероприятия в ОЭС необходимо проводить с момента начала конфликтного взаимодействия, в результате чего уменьшается временной интервал, в течение которого ЛК может провести атаку, при этом эффективность комплекса падает, а вероятность выигрыша ОЭС в конфликте растет.

В качестве основных мероприятий по защите ОЭС от МЛИ могут рассматриваться экранировка фотоприемного устройства с одновременной имитацией факта его поражения [23], минимизация вероятности оптического контакта с ЛК, а также экранировка ОЭС и самого БЛА с помощью искусственного локального аэрозольного образования (ЛАО). При использовании первого способа вероятны потери в добываемой ОЭС информации, второй способ нами рассмотрен при определении стратегии защиты ОЭС от ЛСР, поэтому остановимся на анализе третьего способа в интересах определения требований к характеристикам аэрозоля, а также путей минимизации возможных потерь в добываемой ОЭС информации.

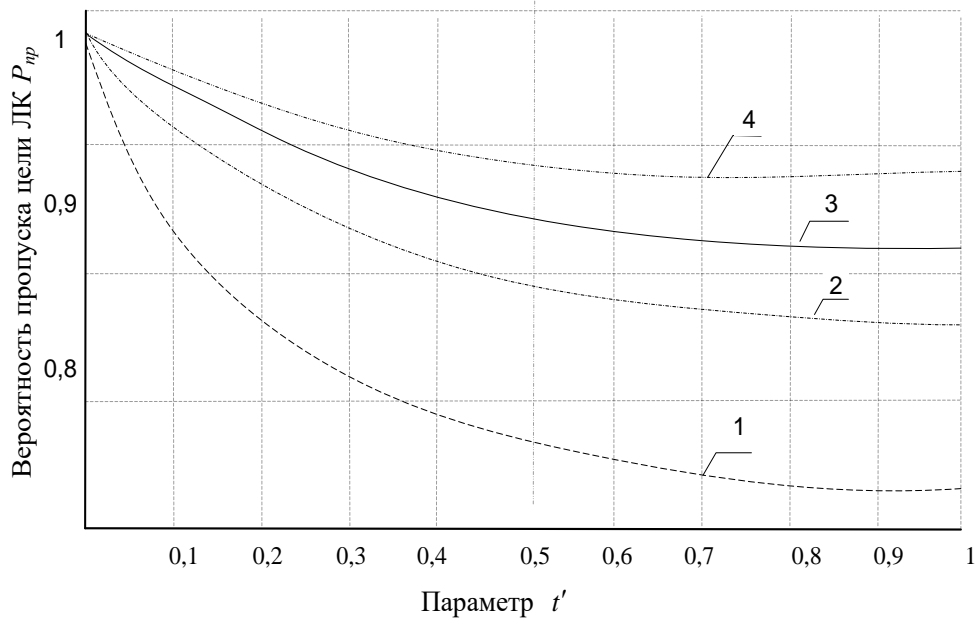


Рис. 11. Зависимости вероятности пропуска ОЭС ЛК от времени его работы нормированного на время нахождения t' ОЭС в зоне поражения:
 1 – $P_{3P} = P_{3П} = 0,1$; 2 – $P_{3P} = 0,1$; $P_{3П} = 0,3$; 3 – $P_{3P} = 0,3$; $P_{3П} = 0,1$;
 4 – $P_{3P} = P_{3П} = 0,3$

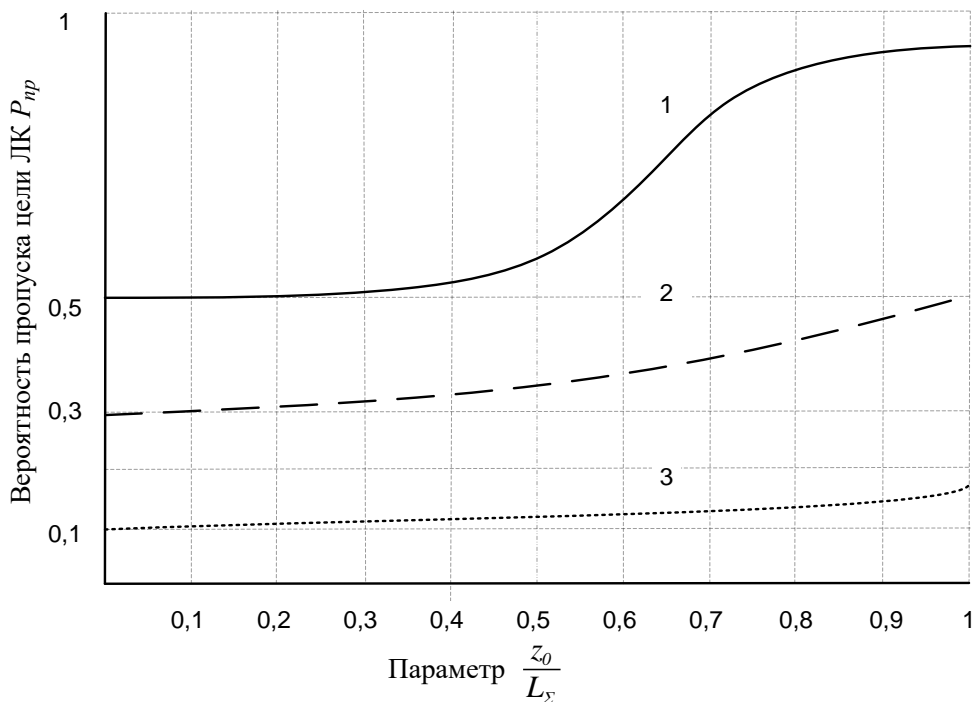


Рис. 12. Зависимость вероятности пропуска ЛК ОЭС БЛА с помощью аэрозольной завесы от дальности ее постановки $\frac{z_0}{L_\Sigma}$ при: линия 1 $\frac{T_a}{T_0} = 0,8$; ли-

ния 2 $\frac{T_a}{T_0} = 0,5$; линия 3 $\frac{T_a}{T_0} = 0,3$

Защита ОЭС и БЛА от МЛИ с помощью ЛАО может быть осуществлена следующим образом. При обнаружении факта подсвета БЛА зондирующим излучением ЛСР с БЛА осуществляется отстрел аэрозолеобразующего боеприпаса. При этом осуществляется скрытие как ОЭС, так и самого БЛА путем формирования ЛАО перпендикулярно линии визирования БЛА-ЛК, комплекс теряет цель и переходит в режим поиска. На рис. 12 представлены результаты расчетов вероятности пропуска ОЭС ЛК в зависимости от дальности формирования ЛАО z_0 , нормированной на величину дистанции ОЭС БЛА – ЛК L при

разных значениях отношения $\frac{T_a}{T_0}$, где T_a – энергетическое ослабление лазерного излучения аэрозольным слоем, а T_0 – амплитудный коэффициент пропускания излучения незамутненной атмосферой.

Расчеты проводились с использованием методик [26], исходные данные приведены в таблице 2. Дополнительно было принято, что ЛАО представляет собой локальный плоскопараллельный слой, поперечные размеры которого составляют 5м. Приведенные зависимости показывают, что вероятность пропуска цели ЛК будет тем выше, чем выше оптическая толщина слоя и чем ближе он располагается к источнику лазерного излучения. Применительно к дуэльной ситуации ОЭС–ЛК этот эффект обсуждался в [24] поэтому более подробно остановимся на анализе зависимости вероятности P_{np} от времени существования аэрозольной завесы. Результаты расчетов данных зависимостей представлены на рис. 13. При их получении полагалось, что коэффициент ослабления лазерного излучения аэрозодем с течением времени меняется по закону Релея [25]. На рис. 13 величины t_1 и t_2 характеризуют время постановки, и эффективное время существования ЛАО соответственно, их значения, а также величина t нормированы на время нахождения ОЭС в зоне поражения ЛК. Среднеквадратическое отклонение времени существования ЛАО принималось равным $t_3 \approx 1/3(t_2 - t_1)$.

Из приведенных на рис. 13 зависимостей видно, что вероятность пропуска ОЭС ЛК существенно зависит от времени существования ЛАО и его оптической толщи. Для эффективной защиты ОЭС от МЛИ величина последней должна иметь значение не менее 2 относительно аналогичного слоя незамутненной атмосферы, а значение времени t_2 желательно иметь как можно более близким к времени нахождения ОЭС в зоне поражения ЛК.

Исключение влияния ЛАО можно обеспечить совершением БЛА резкого маневра по направлению и высоте с сохранением визирования ОЭС наблюдаемого объекта. Естественно, что время выполнения данной операции должно не превышать величины t_3 , а модуль радиус-вектора маневра $\left| \vec{R}_m \right|$ должен удовлетворять условию $\left| \vec{R}_m \right| \sim \ell_3$, в котором ℓ_3 поперечный размер ЛАО (считается что $\ell_3 \sim \ell_u$, где ℓ_u максимальный линейный размер БЛА). При последующих возникновениях дуэльных ситуаций между ОЭС и ЛК рассмотренные защитные мероприятия повторяются. Одновременно с защитой ОЭС обеспечивается возможность защиты планера БЛА от МЛИ.

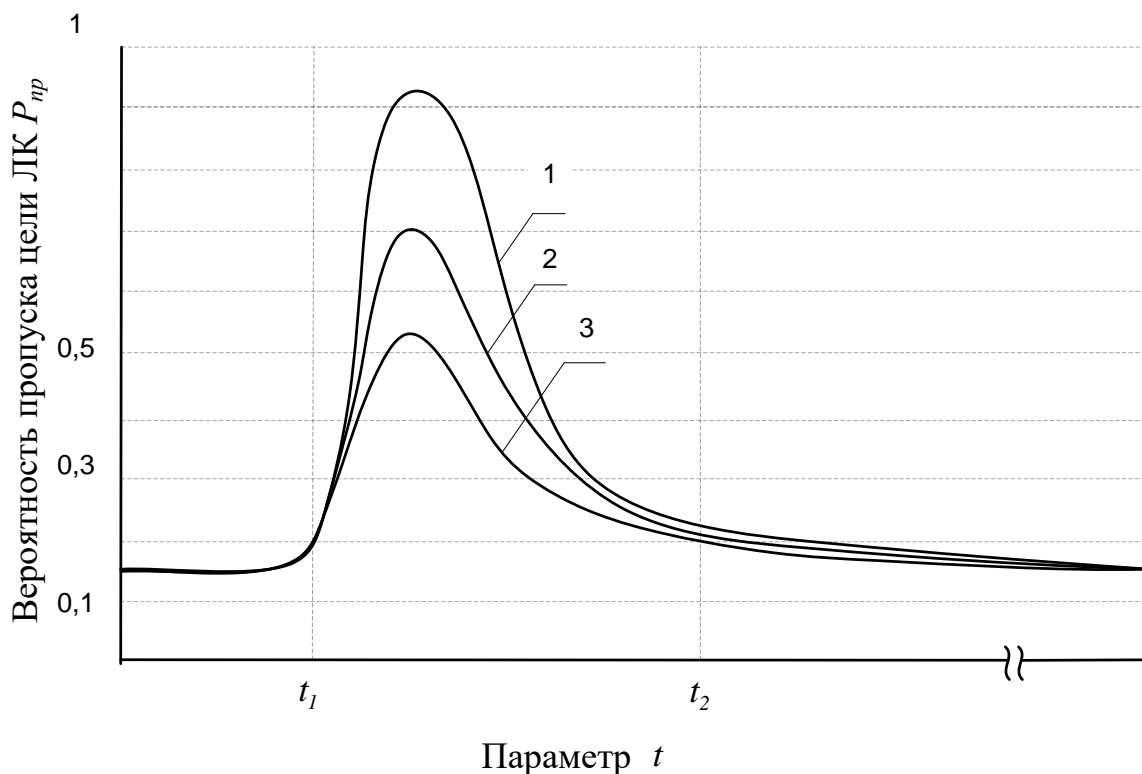


Рис. 13. Зависимость вероятности пропуска ЛК ОЭС БЛА в зависимости от времени существования аэрозольной завесы t при: линия 1 $\frac{T_a}{T_0} = 0,8$;

линия 2 $\frac{T_a}{T_0} = 0,5$; линия 3 $\frac{T_a}{T_0} = 0,3$

Таким образом, в ходе исследований вероятности выигрыша ОЭС БЛА в конфликте с ЛК в зависимости от параметров конфликтующих сторон и условий их функционирования выявлены основные закономерности, позволяющие обосновано выбирать параметры средств защиты, обеспечивающие эффективное выполнение ОЭС целевых задач при максимальном выигрыше в конфликте. Данные закономерности позволяют сделать следующие выводы.

Выводы

В результате представления конфликта ОЭС–ЛК в виде полумарковского случайного процесса с дискретным множеством состояний разработана динамическая модель процесса защиты ОЭС от ЛК, отражающая основные этапы функционирования сторон с учетом их конфликтной обусловленности, и позволяющая определять относительный выигрыш (проигрыш) каждой из конфликтующих сторон на этапах функционирования в заданные моменты времени с учетом общего временного ресурса систем в зависимости от значений их параметров.

На основе проведенных исследований показателей выигрыша в конфликте ОЭС–ЛК установлено, что для максимизации выигрыша ОЭС в конфликте с

ЛК защитные мероприятия необходимо проводить сразу же с момента возникновения конфликтного взаимодействия. При этом стратегия защиты должна включать мероприятия по защите ОЭС от ЛСР и мощного лазерного воздействия. Для определения момента и организации эффективной защиты ОЭС необходимо осуществлять упреждающее обнаружение и пеленгацию излучений ЛК рассеянных атмосферой. При этом выигрыш ОЭС будет тем вероятнее, чем выше вероятность обнаружения ЛК.

Стратегия защиты ОЭС от ЛСР может быть построена на основе снижения его заметности или минимизации вероятности оптического контакта с ЛСР. В первом случае это может осуществляться на основе уменьшения ЭПР ОЭС путем снижения коэффициента отражения фотоприемного устройства, его «выносом» из плоскости резкого изображения за счет расфокусировки объектива или уменьшения площади его входного зрачка. Недостатком этого подхода является зависимость качества и объема получаемой ОЭС информации от проводимых защитных мероприятий. Управление вероятностью оптического контакта между ОЭС и ЛСР может осуществляться на основе данных мониторинга рассеянных атмосферой излучений ЛСР и установления такой траектории сканирования ОЭС, при движении поля зрения, по которой вероятность пересечения с диаграммой направленности ЛСР будет минимальна. Исходя из необходимости обеспечения съема ОЭС требуемого объема информации, второй подход является более перспективным.

Защита ОЭС от мощного лазерного воздействия может быть осуществлена:

- экранированием (частичным или полным) фотоприемного устройства от действия МЛИ;
- отворотом поля зрения фотоприемника от направления на ЛК, определяемого в результате мониторинга рассеянных атмосферой его излучений;
- ослаблением МЛИ на трассе распространения с помощью искусственных локальных аэрозольных образований.

Первые два подхода требуют усложнения конструкции ОЭС и сопряжены с потерями добываемой информации, кроме того при их использовании не решается задача защиты самого БЛА от МЛИ. При использовании третьего подхода, эффективная защита ОЭС возможна если оптическая толщина ЛАО не менее чем в два раза превышает оптическую толщину аналогичного по геометрическим размерам слоя незамутненной атмосферы при этом линейные размеры слоя должны быть не меньше линейных размеров БЛА. Снижение потерь в добываемой БЛА информации возможно путем совершения БЛА резкого маневра по направлению и высоте с сохранением направления визирования ОЭС наблюдаемого объекта.

Соответствие полученных результатов современной теории конфликта [1] и физическому содержанию решаемых задач качественно подтверждает их правильность.

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. Excalibur Prototype Extends Reach of High-Energy Lasers // DARPA [электронный ресурс]. 03.06.2014. – URL: <http://www.darpa.mil/newsevents/2014-03-06> (дата обращения 19.11.2020).
3. О борьбе с беспилотными летательными аппаратами // Военное обозрение [электронный ресурс], 18.07.2016. – URL: <https://topwar.ru/98134-oborbe-s-bespilotnymi-letatelnyimi-apparatami.html> (дата доступа: 19.11.2020).
4. Проект Boeing CLWS. Лазерная ПВО для Пентагона // Военное обозрение [Электронный ресурс], 24.06.2019. – URL: <https://topwar.ru/159300-proekt-boeing-clws-lazernaja-pvo-dlja-pentagona.html> (дата доступа: 19.11.2020).
5. Митрофанов А. Лазерное оружие: сухопутные войска и ПВО. Часть 3 // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 19.03.2019. – URL: <https://topwar.ru/155508-lazernoe-oruzhie-suhoputnye-vojska-i-pvo-chast-3.html> (дата доступа: 19.11.2020).
6. Червоный А. А., Шварц В. А., Козловцев А. П., Чобанян В. А. Вероятностные методы оценки эффективности вооружения / под ред. А. А. Червоного. – М.: Воениздат, 1979. – 95 с.
7. 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: 19.11.2020).
8. Глушков А. Н., Дробышевский Н. В., Кулешов П. Е., 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>. (дата обращения: 19.11.2020).
9. 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. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2019-01/05-Glushkov.pdf>. (дата обращения: 19.11.2020).
10. Дружинин В. В., Конторов Д. С., Конторов М. Д. Введение в теорию конфликта. – М.: Радио и связь, 1989. – 288 с.
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. Уемов А. И. Системный подход и общая теория систем. – М.: Мысль, 1978. – 272 с.

13. Глушков А. Н., Кулешов П. Е., Дробышевский Н. В., Марченко А. В. Модель процесса защиты оптико-электронного средства от импульсного воздействия лазерным излучением в условиях турбулентной атмосферы // Радиосистемы. Выпуск 222: Информационный конфликт в спектре электромагнитных волн. 2018. № 34. С. 39-43.

14. Дробышевский Н. В., Глушков А. Н., Кулешов П. Е. Обеспечение разведзащищенности оптико-электронных средств на основе их параметрической оптимизации // Моделирование авиационных систем: тезисы докладов Всероссийской конференции. – М.: ФГУП «ГосНИИАС», 2018. – С. 186-187.

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

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

17. 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.

18. Дробышевский Н. В., Кулешов П. Е., Глушков А. Н. Датчик пространственного положения луча активного оптико-электронного средства по рассеянной в атмосфере составляющей // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2018. № 6. С. 130-138.

19. Дробышевский Н. В., Кулешов П. Е., Глушков А. Н. Системный анализ разведзащищенности оптико-электронных средств // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2018. № 6. С. 77-83.

20. Дробышевский Н. В., Глушков А. Н., Кулешов П. Е. Программа расчета разведдоступности оптико-электронного средства Свидетельство о регистрации программы на ЭВМ № 2018614514. 2018.

21. Банах В. А., Миронов В. Л. Локационное распространение лазерного излучения в турбулентной атмосфере. Монография / под ред. В. Е. Зуева. – Новосибирск: Наука, 1986. – 174 с.

22. Зуев В. Е., Банах В. А., Покасов В. В. Оптика турбулентной атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 271 с.

23. Глушков А. Н., Кулешов П. Е., Алабовский А. В., Попело В. Д., Марченко А. В. Способ защиты ОЭС от мощного лазерного излучения // Патент на изобретение RU 2709452 G02B, опубл. 17.12.2019, бюл. № 35. – URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2698466C1_20190827 (дата обращения 19.11.2020).

24. Глушков А. Н., Просвирин С. А., Кулешов П. Е., Дробышевский Н. В., Марченко А. В. Методика оценки эффективности защиты оптико-электронного средства от лазерного воздействия с помощью локальных аэрозольных образований // Радиосистемы. Выпуск 222: Информационный конфликт в спектре электромагнитных волн. 2018. № 34. С. 34-38.

25. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.

References

1. Budnikov S. A., Grevcev A. I., Ivancov A. V., Kil'dyushevskij V. M., Kozirackij A. Yu., Kozirackij Yu. L., Kushchev S. S., Lysikov V. F., Parinov M. L., Prohorov D. V. *Modeli informacionnogo konflikta sredstv poiska i obnaruzheniya. Monografija* [Models of information conflict of search and detection tools. Monography]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2013. 232 p. (in Russian).
2. Excalibur Prototype Extends Reach of High-Energy Lasers *DARPA*, 03 June 2014. Available at: <http://www.darpa.mil/news-events/2014-03-06> (accessed 19 November 2020).
3. O bor'be s bespilotnymi letatel'nymi apparatami [About the fight against unmanned aerial vehicles]. *Voennoe obozrenie*, 18 July 2016. Available at: <https://topwar.ru/98134-o-borbe-s-bespilotnymi-letatel'nymi-apparatami.html> (accessed 19 November 2020).
4. Proekt Boeing CLWS. Lazernaja PVO dlja Pentagona [The Boeing CLWS project. Laser air defense for the Pentagon]. *Voennoe obozrenie*, 24 June 2019. Available at: <https://topwar.ru/159300-proekt-boeing-clws-lazernaja-pvo-dlja-pentagona.html> (accessed 1 November 2020).
5. Mitrofanov A. Lazernoe oruzhie: suhoputnye vojska i PVO. Chast' 3 [Laser weapon: ground forces and air defense. Part 3]. *Voennoe obozrenie*, 19 March 2019. Available at: <https://topwar.ru/155508-lazernoe-oruzhie-suhoputnye-vojska-i-pvo-chast-3.html> (accessed 19 November 2020) (in Russian).
6. Chervonyi A. A., Shvarts V. A., Kozlovcev A. P., Chobanyan V. A. *Veroyatnostnye metody otsenki effektivnosti vooruzheniya* [Probabilistic methods for evaluating the effectiveness of weapons]. Moscow, Voenizdat Publ., 1979. 95 p. (in Russian).
7. 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 November 2020) (in Russian).
8. Glushkov A. N., Drobyshevsky N. V., Kuleshov P. E., Marchenko A. V. A systematic approach to ensuring the required intelligence protection of optoelectronic devices. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 4, pp. 92-109. Available at: URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/05-Glushkov.pdf> (accessed 19 November 2020) (in Russian).
9. Glushkov A. N., Drobyshevsky 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. Available at: URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2019-01/05-Glushkov.pdf> (accessed 19 November 2020) (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. Glushkov A. N., Kravtsov R. N., Mitrophanov A. L. An algorithm for optical-electronic assets detection in a randomly inhomogeneous medium. *Radio Communication Theory and Equipment*, 2011, no. 1, pp. 29-36 (in Russian).

12. Ujomov A. I. *Sistemnyj podkhod i obshhaya teoriya sistem* [System approach and general systems theory]. Moscow, Mysl Publ., 1978. 272 p. (in Russian).

13. Glushkov A. N., Kuleshov P. E., Drobyshevsky N. V., Marchenko A. V. Model' protsessa zashity optiko-ehlektronnogo sredstva ot impul'snogo voz-dejstviya lazernym izlucheniem v usloviyakh turbulentnoj atmosfery [Model of the process of protecting an optoelectronic device from pulsed laser radiation in a turbulent atmosphere]. *Radio systems. Issue 222: Information conflict in the spectrum of electromagnetic waves*, 2018, no. 34, pp. 39-43 (in Russian).

14. Drobyshevsky N. V., Glushkov A. N., Kuleshov P. E. Obespechenie razvedzashhishhennosti optiko-ehlektronnykh sredstv na osnove ikh parametriceskoj optimizatsii [Ensuring the intelligence protection of optoelectronic means on a basis of their parameteric optimization]. *Modelirovanie aviatsionnykh sistem: tezisy dokladov Vserossijskoj konferentsii* [Modeling of aviation systems: Abstracts of Papers of the All-Russian conference]. Moscow, Federal state unitary enterprise "GosNIAS", 2018, pp. 186-187 (in Russian).

15. Sergeev I. D. *Voennaya ehntsiklopediya: v 8 tomakh Tom 5: Markirovka boepripasov – «Ogajo»*. [Military encyclopedia in 8 volumes. Volume 5: Marking ammunition – "Ohio"]. Moscow, Voennoe izdatel'stvo Publ., 2001. 575 p. (in Russian).

16. Ivankin E. F., Ponkin V. A. *Teoreticheskie osnovy polucheniya i zashhity informatsii ob ob'ektakh nablyudeniya* [Theoretical foundations for obtaining and protecting information about surveillance objects]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2008. 448 p. (in Russian).

17. Koziratsky Y. L., Grevtsev A. I., Dontsov A. A., Ivantsov A. V., Koziratsky A. Y., Kuleshov P. E., Kusakin O. V., Parinov M. L., Prokhorov D. V. *Obnaruzhenie i koordinatometriya optiko-ehlektronnykh sredstv, otsenka parametrov ikh signalov. Monografija* [Detection and coordination of optoelectronic devices, estimation of their signal parameters. Monography]. Moscow, Radiotekhnika Publ, 2015. 348 p. (in Russian).

18. Drobyshevsky N. V., Kuleshov P. E., Glushkov A. N. Datchik prostranstvennogo polozheniya luchy aktivnogo optiko-ehlektronnogo sredstva po rasseyannoju v atmosfere sostavlyayushhej [Sensor of the spatial position of the beam of an active optoelectronic device based on the component scattered in the atmosphere]. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika*, 2018, no. 6, pp. 130-138 (in Russian).

19. Drobyshevsky N. V., Kuleshov P. E., Glushkov A. N. Sistemnyj analiz razvedzashhishhennosti optiko-ehlektronnykh sredstv [System analysis of intelligence protection of optoelectronic means] *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika*, 2018, no. 6, pp. 77-83 (in Russian).

20. Drobyshevsky N. V., Glushkov A. N., Kuleshov P. E. *Programma rascheta razveddostupnosti optiko-ehlektronnogo sredstva. Svidetel'stvo o registratsii*

programmy na EHVM. [Program for calculating the intelligence availability of optoelectronic means]. The certificate on Official Registration of the Computer Program. No. 2018614514. 2018.

21. Banakh V. A., Mironov V. L. *Lokatsionnoe rasprostranenie lazernogo izlucheniya v turbulentnoj atmosfere. Monografiya* [Location propagation of laser radiation in a turbulent atmosphere. Monography]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986. 174 p. (in Russian).

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

23. Glushkov A. N., Kuleshov P. E., Alabovsky A. V., Popelo V. D., Marchenko A. V. *Sposob zashhity OEHS ot moshhnogo lazernogo izlucheniya* [Method of protecting optoelectronic means against powerful laser radiation]. Patent Russia, no. 2709452. 2019.

24. Glushkov A. N., Prosvirin S. A., Kuleshov P. E., Drobyshevsky N. V., Marchenko A. V. *Metodika otsenki ehffektivnosti zashhity optiko-ehlektronnogo sredstva ot lazernogo vozdeystviya s pomoshh'yu lokal'nykh aehrozol'nykh obrazovaniy* [Methods for evaluating the effectiveness of protection of optoelectronic devices from laser exposure using local aerosol formations]. *Radio systems. Issue 222: Information conflict in the spectrum of electromagnetic waves*, 2018, no. 34, pp. 34-38 (in Russian).

25. Wentzel E. S. *Teoriya veroyatnostej* [Probability theory]. Moscow, Nauka Publ., 1969, 576 p. (in Russian).

Статья поступила 20 ноября 2020 г.

Информация об авторах

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

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

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

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

Modeling a conflict interaction between UAV's optoelectronic equipment and laser systems

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

Problem statement: *The protection of optoelectronic equipment while being in the range of enemy's laser system operation can be impaired due to the fact that the parameters of assets to be protected do not equally affect their effectiveness in the conditions of laser counteraction. Based on this, it is necessary to determine the parameters of protection assets which yield the maximum benefit in the conflict while attaining the objectives assigned to optoelectronic equipment. The aim of this work is to study the process of conflict interaction between the UAV intelligence optoelectronic equipment and adversary laser systems, depending on the parameters of the parties at all stages of their operation. The novelty of the work lies in the application of systematic research methods that allow us to consider the dynamics of the conflict and its main characteristics in conjunction with the actions of the conflicting parties. Result: A mathematical model is developed for the process of protecting optoelectronic equipment against enemy's laser systems. It will allow us to determine the influence of the parameters of the conflicting parties on the probability of winning in the conflict and, as a result, determine the ways of how to protect optoelectronic equipment against laser systems. Practical significance: The main regularities have been found that allow us to reasonably choose the parameters of protection assets which yield the maximum benefit in the conflict while attaining the objectives assigned to optoelectronic equipment.*

Key words: *optoelectronic means, laser system, conflict interaction, probability of state, target drop-out.*

Information about Authors

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

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

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

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