



УДК 623.624.2  
ГРНТИ 78.25.41

## МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА КОНФЛИКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ И ЛАЗЕРНО- ЛОКАЦИОННЫХ СРЕДСТВ ПРОТИВНИКА

*Н.В. ДРОБЫШЕВСКИЙ*

*ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

В статье разработана модель процесса конфликтного взаимодействия разведывательного оптико-электронного средства и лазерно-локационного средства противника. Модель основана на представлении конфликта в виде полумарковского случайного процесса с дискретным множеством состояний и математической формализации зависимостей вероятностей нахождения системы «оптико-электронное средство – лазерное средство разведки» в основных состояниях их функционирования от вероятностных и временных характеристик сторон конфликта. Полученные аналитические выражения позволяют определять влияние параметров конфликтующих сторон на эффективность скрытия оптико-электронного средства.

*Ключевые слова:* оптико-электронное средство, лазерное средство разведки, конфликтное взаимодействие, вероятность состояния, пропуск цели.

## THE RECONNAISSANCE OPTICAL-ELECTRONIC MEANS AND THE ENEMY LASER-LOCATION MEANS CONFLICT INTERACTION PROCESS MODEL

*N.V. DROBYSHEVSKIY*

*MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

In the article the reconnaissance optical-electronic means and the enemy laser-location means conflict interaction process model is developed. The model is based on representing the conflict in the form of a semi-markov random process with a discrete set of states and mathematical formalization of the finding probabilities dependences the system «optoelectronic means – laser reconnaissance means» in the basic states of their functioning on the probabilistic and temporal characteristics of the parties to the conflict. The obtained analytical expressions make it possible to determine the influence of the conflicting parties parameters on the effectiveness of hiding the optical-electronic means.

*Keywords:* optical-electronic means, laser reconnaissance means, conflict interaction, state probability, missed target.

**Введение.** В современных условиях функционирование оптико-электронных средств (ОЭС), размещенных на разведывательных беспилотных летательных аппаратах (БПЛА), 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. Для борьбы с разведывательными БПЛА в развитых странах (США, Израиль, Китай, Великобритания, Германия, Франция и др.) планируется широко использовать комплексы лазерного оружия (КЛО), осуществляющие поражение целей энергией мощного лазерного излучения (МЛИ) [1, 2]. КЛО представляют собой сложные образцы вооружения, осуществляющие разведку целей, наведение на них МЛИ и его генерацию. Для разведки целей могут использоваться радиолокационные станции (РЛС) и лазерные средства разведки (ЛСР). Перспективным способом решения задачи защиты БПЛА от КЛО является скрытие БПЛА от средств разведки КЛО.



**Актуальность.** Сложность решения данной задачи заключается в том, что ОЭС, находящиеся на борту БпЛА, являются не только самыми уязвимыми элементами к лазерному воздействию, но вдобавок ко всему они создают значимый демаскирующий признак БпЛА, так как влияние отражения от бортовых ОЭС приводит к увеличению эффективной площади рассеяния (ЭПР) БпЛА для средств разведки, работающих в оптическом диапазоне электромагнитных волн, в несколько раз. Вследствие этого не только увеличивается их дальность обнаружения, но и возрастает дальность поражения, поскольку БпЛА при поражении ОЭС становятся не боеспособными. Вместе с тем, несмотря на большое количество работ, посвященных указанной проблематике, задача обеспечения требуемой скрытности ОЭС пока не получила законченного решения. На сегодняшний день проектирование конструкции ОЭС проводится без учета необходимости снижения их заметности для ЛСР, а также не используются алгоритмы управления параметрами ведущих съем информации ОЭС для снижения вероятности их обнаружения лазерно-локационными станциями. Главным образом это связано с отсутствием методического аппарата, связывающего параметры ОЭС со скрытностью их работы и эффективностью функционирования, поскольку существующие методики не позволяют: проводить исследования показателей скрытности ОЭС в зависимости от значений их параметров, параметров ЛСР и условий функционирования; обосновывать способы защиты ОЭС БпЛА от их обнаружения и пеленгации ЛСР с учетом обеспечения получения ОЭС требуемого объема первичной разведывательной информации. Данные обстоятельства определяют необходимость разработки научно-методического аппарата, учитывающего основные особенности скрытия ОЭС от ЛСР КЛЮ, и позволяющего проводить системную оценку показателей эффективности скрытного ведения ОЭС БпЛА. Перспективным подходом к решению этой задачи является применение системных методов исследования, позволяющих рассматривать динамику конфликта и его основные характеристики во взаимосвязи с действиями сторон на всех стадиях их функционирования.

**Цель работы** состоит в разработке модели процесса конфликтного взаимодействия разведывательного ОЭС и лазерно-локационного средства противника на основе формализации зависимостей вероятностей нахождения системы ОЭС–ЛСР в основных состояниях их функционирования от вероятностных и временных характеристик сторон конфликта.

Для достижения цели работы разработан граф состояний, описывающий конфликтное взаимодействие двух сторон: сторона *O* представляет собой ОЭС, целевая функция которого состоит в получении информации об объектах стороны *B*. Принято, что ОЭС состоит из подсистемы разведки, подсистемы защиты от разведки КЛЮ и подсистемы управления. Сторона *B* имеет для защиты от съема информации КЛЮ, выполняющим разведку объектов поражения с помощью ЛСР. Данный граф представлен на рисунке 1. Предполагается, что одновременно не может произойти более одного изменения состояний сторон.

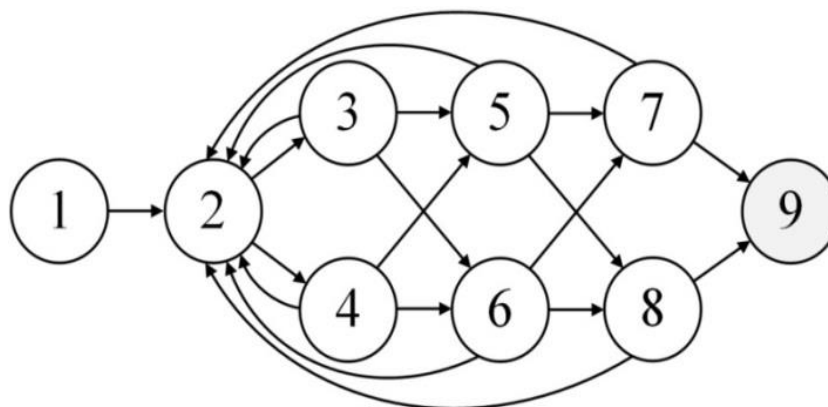


Рисунок 1 – Граф состояний сторон конфликта ОЭС–ЛСР



В приведенном графе введены следующие состояния:

- 1 – ЛСР ожидает внешнее целеуказание (ЦУ); ОЭС ведет разведку заданной области и мониторинг излучений ЛСР;
- 2 – ЛСР обрабатывает целеуказание – ориентируется на ОЭС; ОЭС ведет разведку заданной области и мониторинг излучений ЛСР;
- 3 – ЛСР осуществляет поиск ОЭС – прием отраженного от объекта разведки сигнала; ОЭС ведет разведку заданной области и мониторинг излучений ЛСР, не принимая рассеянное атмосферой излучение ЛСР;
- 4 – ЛСР осуществляет поиск ОЭС – прием отраженного от объекта разведки сигнала; ОЭС принимает рассеянное атмосферой излучение ЛСР и осуществляет защиту от оптического контакта со средством разведки;
- 5 – ЛСР осуществляет обнаружение ОЭС – прием  $m$  отраженных от объекта разведки импульсов из  $n$  излученных; ОЭС ведет разведку заданной области и мониторинг излучений ЛСР, не принимая прямого излучения ЛСР;
- 6 – ЛСР осуществляет обнаружение ОЭС – прием  $m$  отраженных от объекта разведки импульсов из  $n$  излученных; ОЭС принимает прямое излучение ЛСР и осуществляет защиту от обнаружения средством разведки;
- 7 – ЛСР осуществляет распознавание ОЭС; ОЭС ведет разведку заданной области и мониторинг излучений ЛСР, не принимая излучений ЛСР;
- 8 – ЛСР осуществляет распознавание ОЭС; ОЭС принимает прямое излучение ЛСР и осуществляет защиту от распознавания средством разведки;
- 9 – ЛСР выдает информацию о наличии ОЭС в подсистему управления КЛЮ – выигрыш в информационном конфликте с ОЭС.

ОЭС в состоянии 1 (рисунок 1) проводит съем информации, при этом подсистема защиты от разведки лазерным комплексом находится в состоянии ожидания команды на включение режимов защиты. ЛСР в состоянии 1 находится в режиме ожидания внешнего ЦУ (например, от радиолокационной станции), после поступления которого, ЛСР наводится на ОЭС с ошибкой, определяемой точностью целеуказания, – состояние 2. Затем ЛСР переходит в режим поиска ОЭС, в котором в поле ошибок внешнего целеуказания осуществляет просмотр пространства до получения отраженного от объекта сигнала – состояния 3 или 4 (в зависимости от функционирования ОЭС). При нахождении ОЭС в зоне возможного воздействия противника одновременно с реализацией основной целевой функции производится мониторинг противника. Это позволяет обнаружить функционирование ЛСР по рассеянному атмосферой или прямому излучению. При необнаружении ОЭС рассеянного атмосферой излучения ЛСР система ОЭС–ЛСР переходит в состояние 3. 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 – система ОЭС–ЛСР переходит в состояние 4. В случае необнаружения средством разведки отраженного от ОЭС сигнала, система ОЭС–ЛСР возвращается в состояние 2. Если ЛСР принимает отраженный сигнал, то система ОЭС–ЛСР переходит в состояния 5 или 6 (в зависимости от функционирования ОЭС), в которых ЛСР проводит обнаружение ОЭС. Решение о наличии ОЭС принимается в соответствии с логикой: обнаружение не менее  $m$  отраженных от объекта импульсов из  $n$  излученных. При необнаружении ОЭС прямого излучения ЛСР система ОЭС–ЛСР переходит в состояние 5. При обнаружении прямого излучения лазерного локатора система ОЭС–ЛСР переходит в состояние 6, в ОЭС включается режим защиты от обнаружения, например, путем смещения матрицы фотоприемников из плоскости наблюдения (расфокусировка объектива). В случае необнаружения средством разведки ОЭС, система переходит в состояние 2. При обнаружении ОЭС в лазерном средстве разведки осуществляется его распознавание – система переходит в состояния 7 или 8 (в зависимости от функционирования ОЭС). Если ОЭС не принимает прямое излучение ЛСР, то



система ОЭС–ЛСР переходит в состояние 7, в обратном случае – в состояние 8. В этом состоянии в ОЭС может быть использована защита от распознавания, например, путем постановки ложной цели. В случае нераспознавания средством разведки ОЭС, система возвращается в состояние 2. В случае распознавания ОЭС лазерное средство выдает информацию о нем в подсистему управления КЛЮ – состояние 9. В таком случае считается, что ОЭС проиграло в информационном конфликте с ЛСР. Пока система ОЭС–ЛСР не перешла в состояние 9, считается, что ОЭС выигрывает в информационном конфликте. Переходы системы из состояний 3, 4, 5, 6, 7, 8 являются конфликтно-обусловленными, так как зависят от успешного выполнения соответствующих режимов функционирования противостоящей стороной.

Оценка значений вероятностей выигрыша в информационном конфликте может быть выполнена с использованием аппарата теории полумарковских случайных процессов [3, 4].

Для математического описания процесса скрытия ОЭС от ЛСР введем плотности вероятностей времени пребывания системы ОЭС–ЛСР в состоянии  $i$  при переходе в состояние  $j$  –  $\omega_{ij}(\tau)$ . Через  $\tilde{P}_i(\tau)$  обозначим вероятность того, что в интервале времени  $(t, t+\tau)$  система ОЭС–ЛСР попадет в состояние  $i$ . Характеристики переходов из состояний системы ОЭС–ЛСР (рисунок 1) сведем в таблицу 1. Для простоты расчетов будем считать, 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–ЛСР

Сост.	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 $P_{PII}$	Среднее время обнаружения ОЭС рассеянного атмосферой излучения ЛСР $t_{PII}$ . Среднее время наведения ЛСР на ОЭС $t_n$
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 $P_{зок}$	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 $t_{зок}$
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 $P_{зо}$	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 $t_{зо}$
7	Вероятность распознавания ОЭС $P_p$ .	Среднее время распознавания ОЭС $t_p$ .
8	Вероятность распознавания ОЭС $P_p$ . Вероятность защиты ОЭС от обнаружения ЛСР $P_{зр}$	Среднее время распознавания ОЭС $t_p$ . Среднее время выполнения режима защиты ОЭС от распознавания ЛСР $t_{зр}$



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

$$\begin{aligned} P_{12} &= P_{ЦУ}, P_{23} = 1 - P_{ПИ}, P_{24} = P_{ПИ}, P_{35} = P_{o1}(1 - P_{III}), P_{36} = P_{III}P_{o1}, \\ P_{32} &= 1 - P_{o1}, P_{45} = P_{o1}(1 - P_{3OK})(1 - P_{III}), P_{46} = P_{o1}(1 - P_{3OK})P_{III}, \\ P_{42} &= 1 - P_{o1}(1 - P_{3OK}), P_{57} = P_{o3}(1 - P_{III}), P_{58} = P_{o3}P_{III}, P_{52} = 1 - P_{o3}, \\ P_{67} &= P_{o3}(1 - P_{3O})(1 - P_{III}), P_{68} = P_{o3}(1 - P_{3O})P_{III}, P_{62} = 1 - P_{o3}(1 - P_{3O}), \\ P_{79} &= P_p, P_{72} = 1 - P_p, P_{89} = P_p(1 - P_{3P}), P_{82} = 1 - P_p(1 - P_{3P}). \end{aligned} \quad (1)$$

Тогда вероятности перехода в системе ОЭС–ЛСР для одного цикла взаимодействия в соответствии с [4] и (1) опишем следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_1(t) &= P_1\delta(t) - \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}_2(t) &= P_2\delta(t) + \int_0^t [\tilde{P}_1(\tau)P_{12}\omega_{12}(t-\tau) + \tilde{P}_3(\tau)P_{32}\omega_{32}(t-\tau)(1 - \tilde{P}_3(\tau)P_{35}\Omega_{35}(\tau))(1 - \tilde{P}_3(\tau)P_{36}\Omega_{36}(\tau)) + \\ &+ \tilde{P}_4(\tau)P_{42}\omega_{42}(t-\tau)(1 - \tilde{P}_4(\tau)P_{45}\Omega_{45}(\tau))(1 - \tilde{P}_4(\tau)P_{46}\Omega_{46}(\tau)) + \\ &+ \tilde{P}_5(\tau)P_{52}\omega_{52}(t-\tau)(1 - \tilde{P}_5(\tau)P_{57}\Omega_{57}(\tau))(1 - \tilde{P}_5(\tau)P_{58}\Omega_{58}(\tau)) + \\ &+ \tilde{P}_6(\tau)P_{62}\omega_{62}(t-\tau)(1 - \tilde{P}_6(\tau)P_{67}\Omega_{67}(\tau))(1 - \tilde{P}_6(\tau)P_{68}\Omega_{68}(\tau)) + \\ &+ \tilde{P}_7(\tau)P_{72}\omega_{72}(t-\tau)(1 - \tilde{P}_7(\tau)P_{79}\Omega_{79}(\tau)) + \tilde{P}_8(\tau)P_{82}\omega_{82}(t-\tau)(1 - \tilde{P}_8(\tau)P_{89}\Omega_{89}(\tau))] \times \\ &\times (1 - \tilde{P}_2(\tau)P_{23}\Omega_{23}(\tau))(1 - \tilde{P}_2(\tau)P_{24}\Omega_{24}(\tau))d\tau, \\ \tilde{P}_3(t) &= P_3\delta(t) + P_{23}\int_0^t \tilde{P}_2(\tau)\omega_{23}(t-\tau)(1 - \tilde{P}_2(\tau)P_{24}\Omega_{24}(\tau))(1 - \tilde{P}_3(\tau)P_{32}\Omega_{32}(\tau)) \times \\ &\times (1 - \tilde{P}_3(\tau)P_{35}\Omega_{35}(\tau))(1 - \tilde{P}_3(\tau)P_{36}\Omega_{36}(\tau))d\tau, \\ \tilde{P}_4(t) &= P_4\delta(t) + P_{24}\int_0^t \tilde{P}_2(\tau)\omega_{24}(t-\tau)(1 - \tilde{P}_2(\tau)P_{23}\Omega_{23}(\tau))(1 - \tilde{P}_4(\tau)P_{42}\Omega_{42}(\tau)) \times \\ &\times (1 - \tilde{P}_4(\tau)P_{45}\Omega_{45}(\tau))(1 - \tilde{P}_4(\tau)P_{46}\Omega_{46}(\tau))d\tau, \\ \tilde{P}_5(t) &= P_5\delta(t) + \int_0^t [\tilde{P}_3(\tau)P_{35}\omega_{35}(t-\tau)(1 - \tilde{P}_3(\tau)P_{32}\Omega_{32}(\tau))(1 - \tilde{P}_3(\tau)P_{36}\Omega_{36}(\tau)) + \\ &+ \tilde{P}_4(\tau)P_{45}\omega_{45}(t-\tau)(1 - \tilde{P}_4(\tau)P_{42}\Omega_{42}(\tau))(1 - \tilde{P}_4(\tau)P_{46}\Omega_{46}(\tau))] \times \\ &\times (1 - \tilde{P}_5(\tau)P_{52}\Omega_{52}(\tau))(1 - \tilde{P}_5(\tau)P_{57}\Omega_{57}(\tau))(1 - \tilde{P}_5(\tau)P_{58}\Omega_{58}(\tau))d\tau, \\ \tilde{P}_6(t) &= P_6\delta(t) + \int_0^t [\tilde{P}_3(\tau)P_{36}\omega_{36}(t-\tau)(1 - \tilde{P}_3(\tau)P_{32}\Omega_{32}(\tau))(1 - \tilde{P}_3(\tau)P_{35}\Omega_{35}(\tau)) + \\ &+ \tilde{P}_4(\tau)P_{46}\omega_{46}(t-\tau)(1 - \tilde{P}_4(\tau)P_{42}\Omega_{42}(\tau))(1 - \tilde{P}_4(\tau)P_{45}\Omega_{45}(\tau))] \times \\ &\times (1 - \tilde{P}_6(\tau)P_{62}\Omega_{62}(\tau))(1 - \tilde{P}_6(\tau)P_{67}\Omega_{67}(\tau))(1 - \tilde{P}_6(\tau)P_{68}\Omega_{68}(\tau))d\tau, \\ \tilde{P}_7(t) &= P_7\delta(t) + \int_0^t [\tilde{P}_5(\tau)P_{57}\omega_{57}(t-\tau)(1 - \tilde{P}_5(\tau)P_{52}\Omega_{52}(\tau))(1 - \tilde{P}_5(\tau)P_{58}\Omega_{58}(\tau)) + \\ &+ \tilde{P}_6(\tau)P_{67}\omega_{67}(t-\tau)(1 - \tilde{P}_6(\tau)P_{62}\Omega_{62}(\tau))(1 - \tilde{P}_6(\tau)P_{68}\Omega_{68}(\tau))] \times \\ &\times (1 - \tilde{P}_7(\tau)P_{79}\Omega_{79}(\tau))(1 - \tilde{P}_7(\tau)P_{72}\Omega_{72}(\tau))d\tau, \\ \tilde{P}_8(t) &= P_8\delta(t) + \int_0^t [\tilde{P}_5(\tau)P_{58}\omega_{58}(t-\tau)(1 - \tilde{P}_5(\tau)P_{52}\Omega_{52}(\tau))(1 - \tilde{P}_5(\tau)P_{57}\Omega_{57}(\tau)) + \\ &+ \tilde{P}_6(\tau)P_{68}\omega_{68}(t-\tau)(1 - \tilde{P}_6(\tau)P_{62}\Omega_{62}(\tau))(1 - \tilde{P}_6(\tau)P_{67}\Omega_{67}(\tau))] \times \\ &\times (1 - \tilde{P}_8(\tau)P_{89}\Omega_{89}(\tau))(1 - \tilde{P}_8(\tau)P_{82}\Omega_{82}(\tau))d\tau, \\ \tilde{P}_9(t) &= P_9\delta(t) + \int_0^t [\tilde{P}_7(\tau)P_{79}\omega_{79}(t-\tau)(1 - \tilde{P}_7(\tau)P_{72}\Omega_{72}(\tau)) + \\ &+ \tilde{P}_8(\tau)P_{89}\omega_{89}(t-\tau)(1 - \tilde{P}_8(\tau)P_{82}\Omega_{82}(\tau))]d\tau, \end{aligned} \quad (2)$$





где:  $P_j$  – начальные значения вероятностей нахождения систем в  $j$ -ом состоянии ( $j=1\dots 9$ );

$\delta(t)$  – 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 (2) является обобщенным аналитическим описанием динамической модели конфликтного взаимодействия ОЭС–ЛСР, позволяющим определять вероятности выигрыша в конфликте той или иной стороной.

Время выполнения задач сторонами конфликта достаточно хорошо аппроксимируется показательным законом распределения [5]:

$$\omega_{ij}(\tau) = \lambda_i \exp(-\lambda_i \tau),$$

где:  $\lambda_i = 1/t_{cpi}$ ,  $t_{cpi}$  – среднее время нахождения ОЭС или ЛСР в  $i$ -ом состоянии.

Найдем аналитические выражения для оценки вероятности выигрыша ОЭС в конфликте с ЛСР в заданные моменты времени в зависимости от вероятностных и временных характеристик сторон для показательного закона распределения. Исходя из временных характеристик состояний из таблицы 1 запишем выражения для соответствующих безусловных плотностей вероятностей:

$$\begin{aligned} \omega_{12}(\tau) &= \frac{1}{t_\kappa} \exp\left(-\frac{\tau}{t_\kappa}\right), \quad \omega_{23}(\tau) = \frac{1}{t_\mu} \exp\left(-\frac{\tau}{t_\mu}\right), \quad \omega_{24}(\tau) = \frac{1}{t_{PH}} \exp\left(-\frac{\tau}{t_{PH}}\right), \\ \omega_{35}(\tau) &= \omega_{32}(\tau) = \omega_{45}(\tau) = \omega_{46}(\tau) = \frac{1}{t_{o1}} \exp\left(-\frac{\tau}{t_{o1}}\right), \quad \omega_{36}(\tau) = \omega_{58}(\tau) = \frac{1}{t_{III}} \exp\left(-\frac{\tau}{t_{III}}\right), \\ \omega_{42}(\tau) &= \frac{1}{t_{3OK}} \exp\left(-\frac{\tau}{t_{3OK}}\right), \quad \omega_{57}(\tau) = \omega_{52}(\tau) = \omega_{67}(\tau) = \omega_{68}(\tau) = \frac{1}{t_{o3}} \exp\left(-\frac{\tau}{t_{o3}}\right), \\ \omega_{62}(\tau) &= \frac{1}{t_{3O}} \exp\left(-\frac{\tau}{t_{3O}}\right), \quad \omega_{79(72, 89)}(\tau) = \frac{1}{t_p} \exp\left(-\frac{\tau}{t_p}\right), \quad \omega_{82}(\tau) = \frac{1}{t_{3P}} \exp\left(-\frac{\tau}{t_{3P}}\right). \end{aligned}$$

Тогда (2) при начальных условиях  $P_1 = 1$ ,  $P_k = 0$  ( $k=2\dots 9$ ) запишем в виде:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_1(t) &= 1 - \tilde{P}_2(t) - \tilde{P}_3(t) - \tilde{P}_4(t) - \tilde{P}_5(t) - \tilde{P}_6(t) - \tilde{P}_7(t) - \tilde{P}_8(t) - \tilde{P}_9(t), \\ \tilde{P}_2(t) &= \int_0^t \left[ \tilde{P}_1(\tau) \frac{P_{12}}{t_\kappa} e^{-(t-\tau)/t_\kappa} + \tilde{P}_3(\tau) \frac{P_{32}}{t_{o1}} e^{-(t-\tau)/t_{o1}} \left( 1 - \int_0^\tau \tilde{P}_3(t) \frac{P_{35}}{t_{o1}} e^{-u/t_{o1}} du \right) \right] \left( 1 - \int_0^\tau \tilde{P}_3(t) \frac{P_{36}}{t_{III}} e^{-u/t_{III}} du \right) + \\ &+ \tilde{P}_4(\tau) (P_{42} / t_{3OK}) e^{-(t-\tau)/t_{3OK}} \left( 1 - \int_0^\tau \tilde{P}_4(t) (P_{45} / t_{o1}) e^{-u/t_{o1}} du \right) \left( 1 - \int_0^\tau \tilde{P}_4(t) (P_{46} / t_{o1}) e^{-u/t_{o1}} du \right) + \\ &+ \tilde{P}_5(\tau) (P_{52} / t_{o3}) e^{-(t-\tau)/t_{o3}} \left( 1 - \int_0^\tau \tilde{P}_5(t) (P_{57} / t_{o3}) e^{-u/t_{o3}} du \right) \left( 1 - \int_0^\tau \tilde{P}_5(t) (P_{58} / t_{III}) e^{-u/t_{III}} du \right) + \\ &+ \tilde{P}_6(\tau) (P_{62} / t_{3O}) e^{-(t-\tau)/t_{3O}} \left( 1 - \int_0^\tau \tilde{P}_6(t) (P_{67} / t_{o3}) e^{-u/t_{o3}} du \right) \left( 1 - \int_0^\tau \tilde{P}_6(t) (P_{68} / t_{o3}) e^{-u/t_{o3}} du \right) + \\ &+ \tilde{P}_7(\tau) \frac{P_{72}}{t_p} e^{-(t-\tau)/t_p} \left( 1 - \int_0^\tau \tilde{P}_7(t) \frac{P_{79}}{t_p} e^{-u/t_p} du \right) + \tilde{P}_8(\tau) \frac{P_{82}}{t_{3P}} e^{-(t-\tau)/t_{3P}} \left( 1 - \int_0^\tau \tilde{P}_8(t) \frac{P_{89}}{t_p} e^{-u/t_p} du \right) \Big] \times \\ &\times \left( 1 - \int_0^\tau \tilde{P}_2(t) (P_{23} / t_\mu) e^{-u/t_\mu} du \right) \left( 1 - \int_0^\tau \tilde{P}_2(t) (P_{24} / t_{PH}) e^{-u/t_{PH}} du \right) d\tau, \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 \tilde{P}_3(t) &= \int_0^t \tilde{P}_2(\tau)(P_{23}/t_n) e^{-(t-\tau)/t_n} \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_2(t)(P_{24}/t_{PH}) e^{-u/t_{PH}} du\right) \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_3(t)(P_{32}/t_{o1}) e^{-u/t_{o1}} du\right) \times \\
 &\times \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_3(t)(P_{35}/t_{o1}) e^{-u/t_{o1}} du\right) \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_3(t)(P_{36}/t_{III}) e^{-u/t_{III}} du\right) d\tau, \\
 \tilde{P}_4(t) &= \int_0^t \tilde{P}_2(\tau)(P_{24}/t_{PH}) e^{-(t-\tau)/t_{PH}} \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_2(t)(P_{23}/t_n) e^{-u/t_n} du\right) \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_4(t)(P_{42}/t_{3OK}) e^{-u/t_{3OK}} du\right) \times \\
 &\times \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_4(t)(P_{45}/t_{o1}) e^{-u/t_{o1}} du\right) \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_4(t)(P_{46}/t_{o1}) e^{-u/t_{o1}} du\right) d\tau, \\
 \tilde{P}_5(t) &= \int_0^t \left[ \tilde{P}_3(\tau) \frac{P_{35}}{t_{o1}} e^{-(t-\tau)/t_{o1}} \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_3(t) \frac{P_{32}}{t_{o1}} e^{-u/t_{o1}} du\right) \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_3(t) \frac{P_{36}}{t_{III}} e^{-u/t_{III}} du\right) + \right. \\
 &+ \tilde{P}_4(\tau)(P_{45}/t_{o1}) e^{-(t-\tau)/t_{o1}} \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_4(t)(P_{42}/t_{3OK}) e^{-u/t_{3OK}} du\right) \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_4(t)(P_{46}/t_{o1}) e^{-u/t_{o1}} du\right) \left. \right] \times \\
 &\times \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_5(t) \frac{P_{52}}{t_{o3}} e^{-u/t_{o3}} du\right) \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_5(t) \frac{P_{57}}{t_{o3}} e^{-u/t_{o3}} du\right) \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_5(t) \frac{P_{58}}{t_{III}} e^{-u/t_{III}} du\right) d\tau, \\
 \tilde{P}_6(t) &= \int_0^t \left[ \tilde{P}_3(\tau) \frac{P_{36}}{t_{III}} e^{-(t-\tau)/t_{III}} \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_3(t) \frac{P_{32}}{t_{o1}} e^{-u/t_{o1}} du\right) \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_3(t) \frac{P_{35}}{t_{o1}} e^{-u/t_{o1}} du\right) + \right. \\
 &+ \tilde{P}_4(\tau)(P_{46}/t_{o1}) e^{-(t-\tau)/t_{o1}} \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_4(t)(P_{42}/t_{3OK}) e^{-u/t_{3OK}} du\right) \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_4(t)(P_{45}/t_{o1}) e^{-u/t_{o1}} du\right) \left. \right] \times \\
 &\times \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_6(t) \frac{P_{62}}{t_{3O}} e^{-u/t_{3O}} du\right) \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_6(t) \frac{P_{67}}{t_{o3}} e^{-u/t_{o3}} du\right) \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_6(t) \frac{P_{68}}{t_{o3}} e^{-u/t_{o3}} du\right) d\tau, \\
 \tilde{P}_7(t) &= \int_0^t \left[ \tilde{P}_5(\tau) \frac{P_{57}}{t_{o3}} e^{-(t-\tau)/t_{o3}} \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_5(t) \frac{P_{52}}{t_{o3}} e^{-u/t_{o3}} du\right) \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_5(t) \frac{P_{58}}{t_{III}} e^{-u/t_{III}} du\right) + \right. \\
 &+ \tilde{P}_6(\tau)(P_{67}/t_{o3}) e^{-(t-\tau)/t_{o3}} \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_6(t)(P_{62}/t_{3O}) e^{-u/t_{3O}} du\right) \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_6(t)(P_{68}/t_{o3}) e^{-u/t_{o3}} du\right) \left. \right] \times \\
 &\times \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_7(t)(P_{79}/t_p) e^{-u/t_p} du\right) \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_7(t)(P_{72}/t_p) e^{-u/t_p} du\right) d\tau, \\
 \tilde{P}_8(t) &= \int_0^t \left[ \tilde{P}_5(\tau) \frac{P_{58}}{t_{III}} e^{-(t-\tau)/t_{III}} \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_5(t) \frac{P_{52}}{t_{o3}} e^{-u/t_{o3}} du\right) \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_5(t) \frac{P_{57}}{t_{o3}} e^{-u/t_{o3}} du\right) + \right. \\
 &+ \tilde{P}_6(\tau)(P_{68}/t_{o3}) e^{-(t-\tau)/t_{o3}} \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_6(t)(P_{62}/t_{3O}) e^{-u/t_{3O}} du\right) \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_6(t)(P_{67}/t_{o3}) e^{-u/t_{o3}} du\right) \left. \right] \times \\
 &\times \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_8(t)(P_{89}/t_p) e^{-u/t_p} du\right) \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_8(t)(P_{82}/t_{3P}) e^{-u/t_{3P}} du\right) d\tau, \\
 \tilde{P}_9(t) &= \int_0^t \left[ \tilde{P}_7(\tau) \frac{P_{79}}{t_p} e^{\frac{t-\tau}{t_p}} \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_7(t) \frac{P_{72}}{t_p} e^{-\frac{u}{t_p}} du\right) + \tilde{P}_8(\tau) \frac{P_{89}}{t_p} e^{\frac{t-\tau}{t_p}} \left(1 - \int_0^\tau \tilde{P}_8(t) \frac{P_{82}}{t_{3P}} e^{-\frac{u}{t_{3P}}} du\right) \right] d\tau.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Полученные выражения (2 и 3) с системных позиций описывают конфликтное взаимодействие ОЭС–ЛСР и позволяют определять влияние их параметров на эффективность скрытия ОЭС БЛА.

С использованием разработанной модели проведены исследования эффективности скрытия ОЭС от ЛСР. Вероятность обнаружения  $P_{o1}$  и время обнаружения  $t_{o1}$  ЛСР отраженного от ОЭС сигнала определялись на основе модели ОЭС как объекта разведки [6] и были равны  $P_{o1} = 0.5$ ,  $t_{o1} = 0.001$  (времена  $t(-)$  нормировались ко времени выполнения задания ОЭС  $T$ ). Вероятность  $P_{o3}$  определялась исходя из логики – обнаружение не менее 3 отраженных от ОЭС сигналов из 5 излученных импульсов по формуле:

$$P_{o3} = 10P_{o1}^3(1-P_{o1})^2 + 5P_{o1}^4(1-P_{o1}) + P_{o1}^5 = 0.5.$$



Вероятности  $P_{цв}$ ,  $P_{пш}$  приняты равными 1, вероятность  $P_{рп} = 0.1$ , а  $P_p = P_{o3}$ . Временные характеристики конфликта задавались следующими соотношениями:  $t_u = 0.003T$ ;  $t_k = 0.001t_u$ ;  $t_{o3} = 4t_{o1}$ ;  $t_p = t_{o3}$ ;  $t_{рп} = t_u + 0.1t_{o1}$ ;  $t_{пш} = t_u + t_{o1}$ ;  $t_{зок} = t_{зр} = t_u$ ;  $t_{зо} = 0.1t_u$ . Полученные в результате моделирования зависимости представлены на рисунках 2, 3. На рисунке 2 с целью верификации разработанной модели представлены зависимости вероятности нахождения системы ОЭС–ЛСР  $P_C$  в  $i$ -ых ( $i=1 \dots 9$ ) состояниях к моменту времени  $t$  ( $t=1=T$ ).

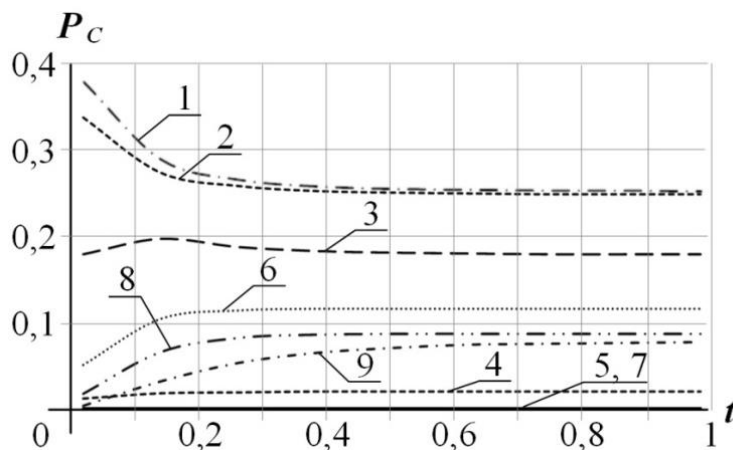


Рисунок 2 – Зависимости вероятности  $P_C$  от времени нахождения ОЭС в зоне обнаружения ЛСР  $t$ ; 1...9 – номер состояния системы из рисунка 1

Из рисунка видно, что динамика изменения значений вероятностей нахождения системы ОЭС–ЛСР приводит к достижению предельных значений вероятностей, причем вероятность выигрыша ЛСР повышается с увеличением нахождения ОЭС в зоне обнаружения ЛСР (зависимость 9), а суммарное значение вероятностей  $P_C$  в конкретный момент времени  $t$

$$\sum_{i=1}^9 P_{C_i}(t) = 1.$$

На рисунке 3 представлены зависимости вероятности пропуска цели ЛСР  $P_B$  в конфликте с ОЭС от времени нахождения ОЭС в зоне обнаружения ЛСР  $t$  при различных вероятностях защиты на этапах конфликтного взаимодействия.

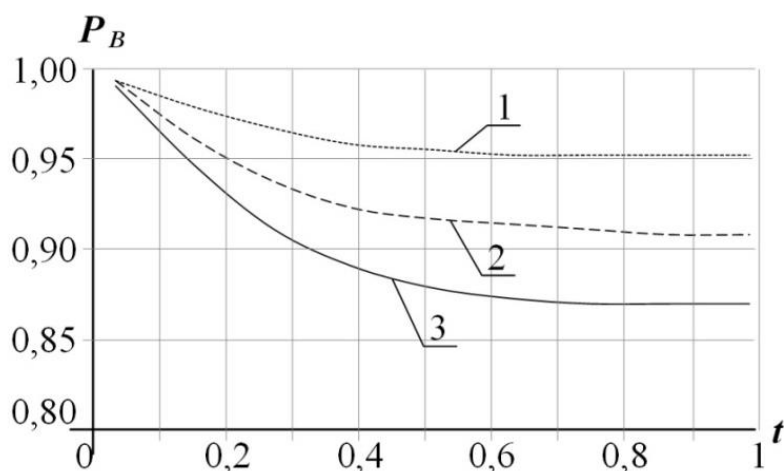


Рисунок 3 – Зависимости вероятности  $P_B$  от  $t$  для: 1 –  $P_{зок}=0.1$ ,  $P_{зо}=0.4$ ,  $P_{зр}=0.7$ ; 2 –  $P_{зок}=0.4$ ,  $P_{зо}=0.4$ ,  $P_{зр}=0.4$ ; 3 –  $P_{зок}=0.7$ ,  $P_{зо}=0.4$ ,  $P_{зр}=0.1$





Из приведённых зависимостей видно, что вероятность  $P_B$  больше при увеличении вероятностей защиты ОЭС  $P_{ЗОК} (z_0, z_P)$  на конечных этапах защиты (зависимость 2 по сравнению с 3, зависимость 1 по сравнению с 2 и 3). Это объясняется уменьшением времени, которое отводится ЛСР для обнаружения и распознавания ОЭС на новом цикле функционирования ЛСР.

Полученные результаты находятся в хорошем согласии с современной теорией конфликта [4]. Следовательно, разработанную модель можно использовать для получения зависимостей вероятности пропуска цели ЛСР  $P_B$  от вероятностных и временных параметров конфликтующих сторон.

**Выводы.** Таким образом, исходя из представления конфликта ОЭС–ЛСР в виде полумарковского случайного процесса с дискретным множеством состояний разработана модель процесса конфликтного взаимодействия разведывательного ОЭС и лазерно-локационного средства противника. В модели математически формализованы зависимости вероятностей нахождения системы ОЭС–ЛСР в основных состояниях их функционирования от вероятностных и временных характеристик сторон конфликта. Разработанные аналитические выражения можно использовать для исследования зависимостей вероятности пропуска цели ЛСР (вероятности скрытия ОЭС) от параметров конфликтующих сторон.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Фомкин Н. Разработка в США комплексов лазерного оружия // Зарубежное военное обозрение. 2017. № 4. С. 34–37.
3. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. М.: Советское радио, 1977. 488 с.
4. Будников С.А., Гревцев А.И., Иванцов А.В. и др. Модели информационного конфликта средств поиска и обнаружения. Монография / Под ред. Ю.Л. Козирацкого. М.: Радиотехника, 2013. 232 с.
5. 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.
6. Дробышевский Н.В., Глушков А.Н., Кулешов П.Е. Модель оптико-электронного средства как объекта разведки // Системы управления, связи и безопасности: журн. 2019. № 1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://sccs.intelgr.com/archive/2019-01/05-Glushkov.pdf> (дата обращения: 16.08.2019).

#### REFERENCES

1. Abramov P.I., Kuznecov E.V., Skvorcov L.A. Perspektivy primeneniya kvantovo-kaskadnyh lazerov v sistemah optiko-`elektronnogo protivodejstviya. Obzor // Opticheskiy zhurnal. 2017. № 5. pp. 56–70.
2. Fomkin N. Razrabotka v SShA kompleksov lazernogo oruzhiya // Zarubezhnoe voennoe obozrenie. 2017. № 4. pp. 34–37.
3. Tihonov V.I., Mironov M.A. Markovskie processy. M.: Sovetskoe radio, 1977. 488 p.
4. Budnikov S.A., Grevcev A.I., Ivancov A.V. i dr. Modeli informacionnogo konflikta sredstv poiska i obnaruzheniya. Monografiya / Pod red. Yu.L. Kozirackogo. M.: Radiotekhnika, 2013. 232 p.
5. Glushkov A.N., Kravcov R.N., Mitrofanov A.L. Algoritm obnaruzheniya optiko-`elektronnyh sredstv v sluchajno-neodnorodnoj srede // Teoriya i tehnika radiosvyazi. 2011. № 1. pp. 29–36.



6. Drobyshevskij N.V., Glushkov A.N., Kuleshov P.E. Model' optiko-`elektronного sredstva kak ob`ekta razvedki // Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti: zhurn. 2019. № 1. [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://sccs.intelgr.com/archive/2019-01/05-Glushkov.pdf> (data obrascheniya: 16.08.2019).

© Дробышевский Н.В., 2019

Дробышевский Николай Васильевич, адъюнкт научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, d\_p.v@mail.ru.