

УДК 519.87

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.1.31

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПОДВОДНОГО НАБЛЮДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПОМЕХ

Л. А. Мартынова<sup>а</sup>, доктор техн. наук, старший научный сотрудник, martynowa999@bk.ru  
<sup>а</sup>АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Малая Посадская ул., 30, Санкт-Петербург, 197046, РФ

**Введение:** автономные необитаемые подводные аппараты выполняют разнообразные задачи, в том числе наблюдение за другими автономными необитаемыми подводными аппаратами, представляющими определенный интерес, например, с коммерческой точки зрения. Задача аппарата-наблюдателя заключается в поддержании постоянного контакта с наблюдаемым объектом и получении информации о его координатах и параметрах движения. В то же время наблюдаемый аппарат стремится избавиться от наблюдения, для чего использует интеллектуальную помеху в виде высокоскоростного аппарата. Интеллектуальность помехи заключается в ее способности распознавать средства противодействия, которые использует против нее наблюдатель, и снижать их влияние выбранной стратегией своего поведения. До сих пор в задачах поиска и преследования объекта, в том числе и в условиях помех, поведение помехи не носило интеллектуальный характер. **Цель исследования:** оценка влияния поведения интеллектуальной помехи на возможность сохранения контакта с наблюдаемым аппаратом в условиях, когда ряд параметров помехи и стратегия ее поведения заранее не определены. **Результаты:** сформирован тактический эпизод наблюдения за сторонним аппаратом, использующим интеллектуальную помеху; выработаны стратегия использования наблюдателем средств противодействия и стратегия поведения высокоскоростного аппарата для снижения влияния средств противодействия. Для оценки влияния определен показатель эффективности, для его расчета разработана математическая модель. В основу расчета показателя эффективности наблюдения положен метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). С помощью разработанной программной реализации математической модели проведены численные эксперименты, что позволило оценить влияние интеллектуальной помехи на возможность сохранения контакта наблюдателя с наблюдаемым аппаратом. **Практическая значимость:** результаты могут быть использованы при планировании стратегии поведения наблюдателя в условиях помех, при выборе технических решений по обеспечению наблюдения за сторонним аппаратом в условиях помех, при выборе средств противодействия интеллектуальной помехе, применяемой наблюдаемым аппаратом.

**Ключевые слова** — автономный необитаемый подводный аппарат, математическое моделирование, метод статистических испытаний, интеллектуальная помеха.

**Цитирование:** Мартынова Л. А. Решение задачи подводного наблюдения в условиях применения интеллектуальных помех// Информационно-управляющие системы. 2018. № 1. С. 31–41. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.1.31

**Citation:** Martynova L. A. Underwater Observation under Intellectual Interference. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 1, pp. 31–41 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.1.31

### Введение

В сетцентрической системе защиты заданного морского района одним из элементов являются подводные необитаемые аппараты, проводящие освещение обстановки, в том числе обнаружение аппаратов, оказавшихся в заданном районе, которые требуют наблюдения и сопровождения: один из аппаратов — наблюдатель — ведет наблюдение за другим аппаратом — наблюдаемым. Задача аппарата-наблюдателя заключается в поддержании постоянного контакта с наблюдаемым объектом и получении информации о его координатах и параметрах движения. Однако наблюдение со стороны наблюдателя может противоречить интересам наблюдаемого аппарата, поэтому для уклонения от наблюдения он может использовать помеху в виде высокоскоростного самоходного необитаемого подводного аппарата, существенно превосходящего в скорости перемещения наблюдателя. Высокоскоростной аппарат создает невыносимые условия наблюдения, по

крайней мере на некоторое время, и тем самым дает возможность наблюдаемому аппарату оторваться от наблюдателя. В таких условиях задача наблюдателя — продолжать вести наблюдение в условиях помех. При этом наблюдателю необходимо решить две задачи:

- максимально снизить эффект создания высокоскоростным аппаратом помехи;
- не потерять контакт с наблюдаемым аппаратом.

Последнее означает, что в случае уклонения от помехи наблюдатель может отойти на дистанцию, прерывающую его контакт с наблюдаемым аппаратом и не позволяющую вести наблюдение. В этом случае после преодоления помехи наблюдателю вновь придется вести поиск аппарата наблюдения и только после обнаружения перейти в режим его наблюдения.

Для того чтобы максимально снизить эффект создания помехи, наблюдателю необходимо, прежде всего, использовать маневр уклонения, однако этого недостаточно из-за большого превосход-

ства по скорости высокоскоростного аппарата. Поэтому дополнительным способом снижения влияния помехи является использование некоторого арсенала средств противодействия высокоскоростному аппарату. Высокоскоростной аппарат способен в силу своего интеллекта, в свою очередь, преодолеть эти средства, однако на это будет затрачено некоторое время, а время его функционирования ограничено энергоресурсом.

В связи с этим возникает задача оценки влияния интеллектуальной помехи на возможность сохранения контакта наблюдателя с наблюдаемым аппаратом.

Подобным задачам, классифицируемым как задачи поиска и преследования, в том числе в условиях помех [1–10], в литературе уделено достаточно внимания. Например, из теории игр известна задача о водителе-убийце [11], в которой гипотетический убегающий может двигаться медленно, но маневренно, пытаясь уйти от водителя, ведущего машину куда быстрее, но существенно ограниченного в маневре. При этом автор Р. Айзекс вместо «водителя» и «пешехода» подразумевал торпеду и увертывающийся от нее небольшой катер [12]. Дискретная версия задачи описана в работе [13].

В указанных работах формирование оптимального поведения помехи рассматривалось без присущего ей искусственного интеллекта, позволяющего менять тактику и параметры создания помехи в зависимости от сложившейся ситуации, связанной с использованием против них способов снижения формируемой помехи. До настоящего времени в такой постановке задача формирования помехи со сложным поведением и в условиях противодействия помехе не рассматривалась.

Целью настоящей работы является оценка влияния стратегии поведения наблюдателя в условиях интеллектуальной помехи, создаваемой высокоскоростным аппаратом, и стратегии использования против высокоскоростного аппарата мер противодействия, снижающих эффект влияния помехи на возможность наблюдателя удерживать контакт с наблюдаемым аппаратом.

Для достижения цели в работе были решены следующие задачи:

- определена тактическая ситуация, учитывающая различные стратегии поведения высокоскоростного аппарата и средств противодействия помехам;

- определены показатели эффективности сохранения контакта с наблюдаемым аппаратом путем создания противодействия помехам;

- разработана математическая модель поведения наблюдателя в условиях помех;

- разработан план численного эксперимента и проведены расчеты с использованием программной реализации разработанной математической модели;

- на основе полученных результатов выданы рекомендации по стратегии поведения наблюдателя в условиях помех.

### Описание тактической ситуации наблюдения одним автоматическим аппаратом другого

Рассматривается задача ведения наблюдения одним автономным необитаемым подводным аппаратом другого. Аппарат-наблюдатель ведет наблюдение на дистанции, не превышающей  $D_{\text{набл}}$ , исходя из своих технических возможностей.

Наблюдаемый аппарат стремится уйти в отрыв от наблюдателя, для чего использует высокоскоростной аппарат, создающий помехи наблюдателю и вынуждающий его маневрировать. В результате наблюдаемому аппарату удается увеличить дистанцию, с которой наблюдение за ним становится проблематичным.

Предполагается, что в ответ на действия высокоскоростного аппарата наблюдатель для снижения создаваемой высокоскоростным аппаратом помехи использует:

- маневр уклонения по курсу, скорости и глубине, в ходе которого в максимально короткие сроки пытается выйти из трехмерного коридора, просматриваемого высокоскоростным аппаратом в процессе создания помех наблюдателю;

- специальные средства противодействия высокоскоростному аппарату для того, чтобы высокоскоростной аппарат потерял ориентацию в пространстве и затратил определенное время на ее восстановление.

Привести высокоскоростной аппарат к потере ориентации способны устройства, которые:

- создают помехи обнаружения своего сигнала дрейфующим прибором помех;

- создают искаженное поле, в результате чего скоростной аппарат сходит с истинного маршрута и движется в ложном направлении (имитаторы);

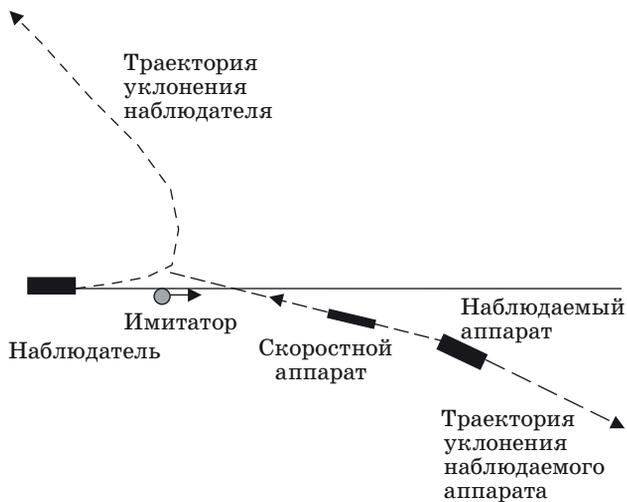
- создают физические препятствия, в которых скоростной аппарат «вязнет» и не имеет возможности выбраться (анти-аппарат).

Относительно высокоскоростного аппарата предполагается, что он достаточно интеллектуален, чтобы избегать создаваемые ему трудности, и постоянно пытается помешать наблюдателю путем сближения с ним на дистанцию контакта. Сближение на дистанцию контакта означает, что после этого наблюдатель на некоторое время не способен вести наблюдение за интересующим его аппаратом.

Относительно наиболее целесообразной стратегии использования средств, создающих трудности высокоскоростному аппарату, предполагается, что до того, как начать маневрирование,

наблюдатель выпускает самоходное средство, создающее ложное поле (на циркуляции выпуск самоходного средства (имитатора) невозможен по техническим причинам). На рис. 1 показана траектория движения имитатора, отводящего высокоскоростной аппарат на ложное направление.

Через некоторое время происходит выпуск дрейфующего прибора помех, в результате чего в зоне вокруг него создается высокоуровневый шум, затрудняющий обнаружение высокоскоростным аппаратом наблюдателя (рис. 2).

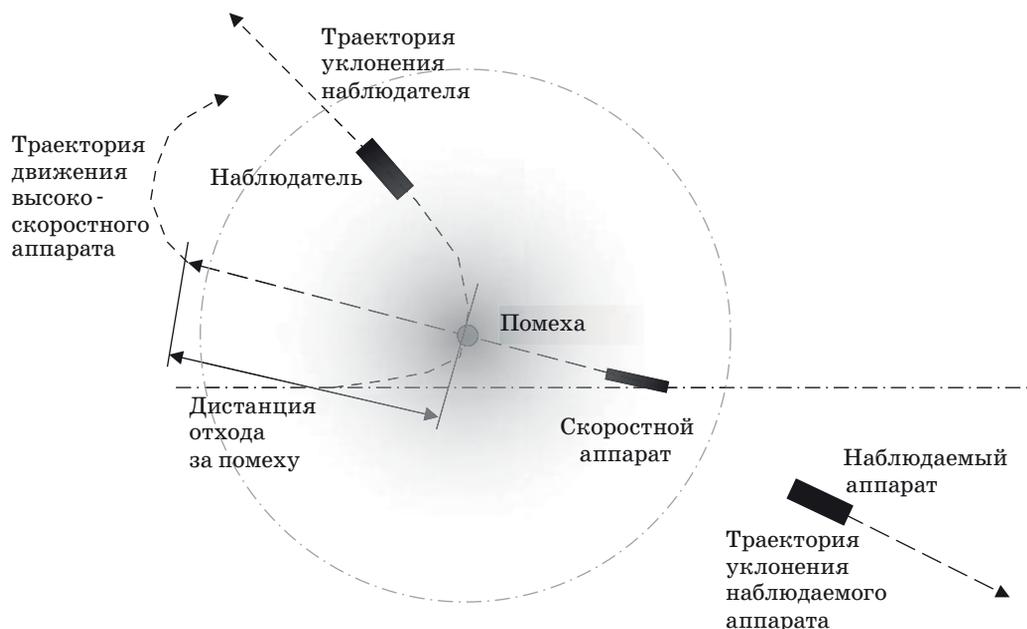


■ **Рис. 1.** Схема взаимного положения наблюдателя и наблюдаемого аппарата  
 ■ **Fig. 1.** Diagram of the relative position of the observer and the observed apparatus

Наблюдатель использует дрейфующий прибор помех так, чтобы шум помехи не заглушал сигнал имитатора. Принимаем, что помеха может находиться и в стороне от направления движения скоростного аппарата. Если в результате прибор помех отвлек на некоторое время высокоскоростной аппарат, то последний возвращается и вновь осуществляет поиск наблюдателя. В случае его обнаружения высокоскоростной аппарат переходит в режим сопровождения наблюдателя. Тогда наблюдателем используется самоходный аппарат (анти-аппарат), приводящий в негодность высокоскоростной аппарат. Применение анти-аппарата наиболее эффективно на коротких дистанциях, так как на больших дистанциях анти-аппарата не способна обнаружить и попасть в высокоскоростной аппарат. Дистанция использования анти-аппарата около 400 м.

Предполагается, что скоростной аппарат достаточно «умный», чтобы с течением времени разобраться в том, что перед ним ложный аппарат, или преодолеть создаваемое помехой поле. При возникновении имитатора, который вызывает его отведение на ложное направление, высокоскоростной аппарат с некоторой дистанции  $D_{кл}$  классифицирует имитатор как ложную цель и понимает, что сошел с истинной траектории. После этого высокоскоростной аппарат возвращается в точку последнего контакта с наблюдателем, чтобы попытаться снова создать ему помеху.

При возникновении шумовой помехи резко сокращается дальность обнаружения, пока пре-



■ **Рис. 2.** Схема применения помехи, препятствующей обнаружению высокоскоростным аппаратом наблюдателя  
 ■ **Fig. 2.** Schematic of the use of interference preventing detection of an observer by a high-speed device

следователь находится в зоне действия помех. За счет собственного интеллекта и проводимых измерений уровня шума самоходный аппарат находит оптимальный выход из района создаваемых ему помех. По уровню шума он выбирает в качестве наиболее целесообразной тактики движение в эпицентр источника помех с тем, чтобы пройти его насквозь, поскольку такой подход представляет собой кратчайший путь преодоления зоны действия помехи в виде круга. После преодоления помехи самоходный аппарат переходит на траекторию поиска наблюдателя для продолжения создания ему помех и отрыва от наблюдения с его стороны.

Принимается, что при близкой дистанции до высокоскоростного аппарата наблюдатель использует анти-аппарат, поскольку на таких дистанциях другие средства (имитатор и дрейфующий прибор помех) неэффективны. При этом высокоскоростной аппарат не имеет возможности без сторонней помощи выбраться и продолжить создание помехи наблюдателю.

Задача состояла в оценке возможности сохранения контакта с наблюдаемым аппаратом после уклонения от высокоскоростного аппарата.

Влияние на сохранение контакта с наблюдаемым аппаратом оказывает то, что стратегия применения мешающих средств со стороны наблюдателя выбирается таким образом, чтобы свести к минимуму попытки высокоскоростного аппарата помешать наблюдению.

После потери контакта с наблюдателем высокоскоростному аппарату придется возобновить поиск наблюдателя, однако ограниченность его энергоресурса не позволит ему вести этот поиск бесконечно.

Для проведения оценки возможности сохранения контакта с наблюдаемым аппаратом после его уклонения от высокоскоростного аппарата определен показатель эффективности его наблюдения.

Поскольку задача состоит в оценке влияния стратегии наблюдателя на сохранение контакта с наблюдаемым аппаратом после уклонения от высокоскоростного аппарата, то в качестве показателя эффективности выбрана вероятность сохранения контакта наблюдателя с наблюдаемым аппаратом.

Расчет вероятности сохранения контакта происходил с учетом того, что задача рассматривается в условиях неопределенности, т. е. при неизвестной заранее стратегии поведения высокоскоростного аппарата, которая зависит в свою очередь от используемых против него заранее известных средств противодействия.

Поскольку ряд параметров заранее неизвестен, включая параметры поведения высокоскоростного аппарата, то для расчета вероятности сохранения контакта наблюдателя с наблюдаемым аппаратом используем метод статистических ис-

пытаний (метод Монте-Карло) [14, 15], применяемый авторами ранее при проведении подобных исследований [16–20].

Проводилась серия из  $N_{\text{исп}}$  испытаний. В каждом испытании определялось прерывание контакта наблюдателя с наблюдаемым аппаратом или сохранение контакта. В случае сохранения контакта испытание считалось результативным, в случае прерывания контакта — нерезультативным. Вероятность сохранения контакта определялась как отношение результативных испытаний к общему количеству испытаний.

Для расчета вероятности сохранения контакта была разработана математическая модель.

### Описание математической модели

В математической модели рассматриваемые объекты: наблюдатель, наблюдаемый объект, высокоскоростной аппарат, самоходный имитатор — формализуем как материальные точки, движение которых определяется курсом, скоростью, дифференциалом, а их положение характеризуется глубиной и координатами. При использовании помехи оценивалось время окончания маневра по курсу, скорости и глубине. При проведении расчетов производился переход из географической системы координат (широта, долгота) в местную (локальную) систему координат, определяемую следующим образом: центр земной системы координат совпадает с математическим ожиданием положения наблюдателя, первая ось направлена в сторону математического ожидания положения высокоскоростного аппарата на тот же момент времени, вторая ось направлена вертикально вверх, третья ось образует правую тройку с первыми двумя осями.

Время хода звука используемого скоростного аппарата до наблюдателя определяется выражением

$$t_{sndm} = \frac{r}{V_{ssnd}},$$

где  $V_{ssnd}$  — скорость звука в воде;  $r$  — расстояние между скоростным аппаратом и наблюдателем, которое определяется по формуле

$$r = \sqrt{x_1^2 + x_3^2}.$$

Здесь  $x_1$  и  $x_3$  — полярные координаты наблюдателя относительно высокоскоростного аппарата. Через стартовые декартовы координаты корабля  $k_{k0[1]}$ ,  $k_{k0[3]}$  и стартовые декартовы координаты  $k_{t01}$ ,  $k_{t03}$  скоростного аппарата они вычисляются по формулам

$$x_1 = k_{k01} - k_{t01} + t_{beg} \cdot V_{ss} \cdot \cos(q_k);$$

$$x_3 = k_{k03} - k_{t03} + t_{beg} \cdot V_{ss} \cdot \sin(q_k),$$

где  $t_{beg}$  — время начала поиска;  $V_{ss}$  — текущая скорость аппарата;  $q_k$  — текущий курс наблюдателя.

Определение времени начала уклонения наблюдателя от высокоскоростного аппарата определяется выражением

$$t_y = t_{beg} + t_{sol} + t_{ndm},$$

где  $t_{sol}$  — время принятия решения.

Определение угла отворота наблюдателя  $Q_{otv}$  (значение угла — случайное, поскольку зависит от ряда факторов, которые заранее неизвестны) определяется выражением

$$Q_{otv} = \frac{\pi}{2} + p - q_k + Q_{mn} + x \cdot (Q_{mx} - Q_{mn}),$$

где  $p$  — угол между первой осью земной системы координат и направлением от высокоскоростного аппарата на наблюдателя;  $x$  — случайное число, разыгрываемое равномерно;  $Q_{mn}$ ,  $Q_{mx}$  — минимальное и максимальное значение из заданного диапазона углов отворота.

Расчет времени  $t_V$  увеличения скорости до максимально допустимой  $V_{ssyf}$  происходил по формуле

$$t_V = t_y + b_{ass_1} \cdot \frac{V_{ssyf} - V_{ss}}{b_{ass_2} \cdot a_{ss}},$$

где  $b_{ass}$ ,  $a_{ss}$  — коэффициенты движения скоростного аппарата по окружности.

Путь  $s_V$ , проходимый высокоскоростным аппаратом в ходе набора скорости до предельно допустимого значения, определяется выражением

$$s_V = b_{ass_1} \cdot V_{ss} \cdot (t_V - t_y) + b_{ass_2} a_{ss} \frac{(t_V - t_y)^2}{2}.$$

Пусть скорость  $s_{V1}$  высокоскоростного аппарата на циркуляции при повороте от текущего угла на угол отворота определяется выражением

$$s_{V1} = |Q_{otv}| \cdot r_z.$$

Сравниваем, какой путь при маневре больше: по скорости  $t_V$  или по курсу  $t_\psi$ ; если по скорости, т. е.  $s_V < s_{V1}$ , то путь  $s_{k1}$ , проходимый наблюдателем при ускорении в режиме циркуляции от начальной скорости до максимальной, определяется выражениями

$$s_{k1} = s_V;$$

$$t_\psi = t_V + t_{sol} + \frac{s_{V1} - s_v}{b_{ass_1} V_{ssyf}};$$

если по курсу:

$$s_{k1} = s_{V1};$$

$$t_\psi = t_y + t_{sol} + \frac{-b_{ass_1} \cdot V_{ss} + \sqrt{(b_{ass_1} \cdot V_{ss})^2 + 2b_{ass_2} \cdot a_{ss} \cdot s_{V1}}}{b_{ass_2} \cdot a_{ss}}.$$

Пересчет времени  $t_V$ , затрачиваемого на разгон до максимальной скорости с учетом потери скорости на циркуляции, определяется выражением

$$t_V = t_\psi + \frac{ssyf - V_{ss}}{a_{ss}} - b_{ass_2} \cdot \frac{t_\psi - t_y}{b_{ass_1}} - t_{sol}.$$

Тогда максимальное время, затрачиваемое на маневр, определяется соотношениями

$$t_{y_{mx}} = t_V \text{ при } t_\psi < t_V;$$

$$t_{y_{mx}} = t_\psi \text{ при } t_\psi \geq t_V.$$

Маневр по глубине считается следующим образом:

$$t_h = t_{y_{mx}} + \frac{h_{mn} - hk_2}{V_{ssyf} \cdot \sin \theta} \text{ при } \theta > 0;$$

$$t_h = t_{y_{mx}} + \frac{h_{mx} - hk_2}{V_{ssyf} \cdot \sin \theta} \text{ при } \theta \leq 0,$$

где  $\theta$  — дифферент наблюдателя.

На этом расчет времени окончания маневра уклонения наблюдателя по курсу, скорости и глубине от высокоскоростного аппарата закончен. Полученные значения использованы затем в математической модели при определении текущих координат наблюдателя в период его маневрирования.

В каждом цикле имитации воспроизводились процессы перемещения наблюдателя, наблюдаемого объекта, высокоскоростного аппарата, самоходного имитатора в соответствии с принятой стратегией их поведения. Кроме того, воспроизводились результаты функционирования средств противодействия высокоскоростному аппарату и его поведение для снижения эффекта их воздействия.

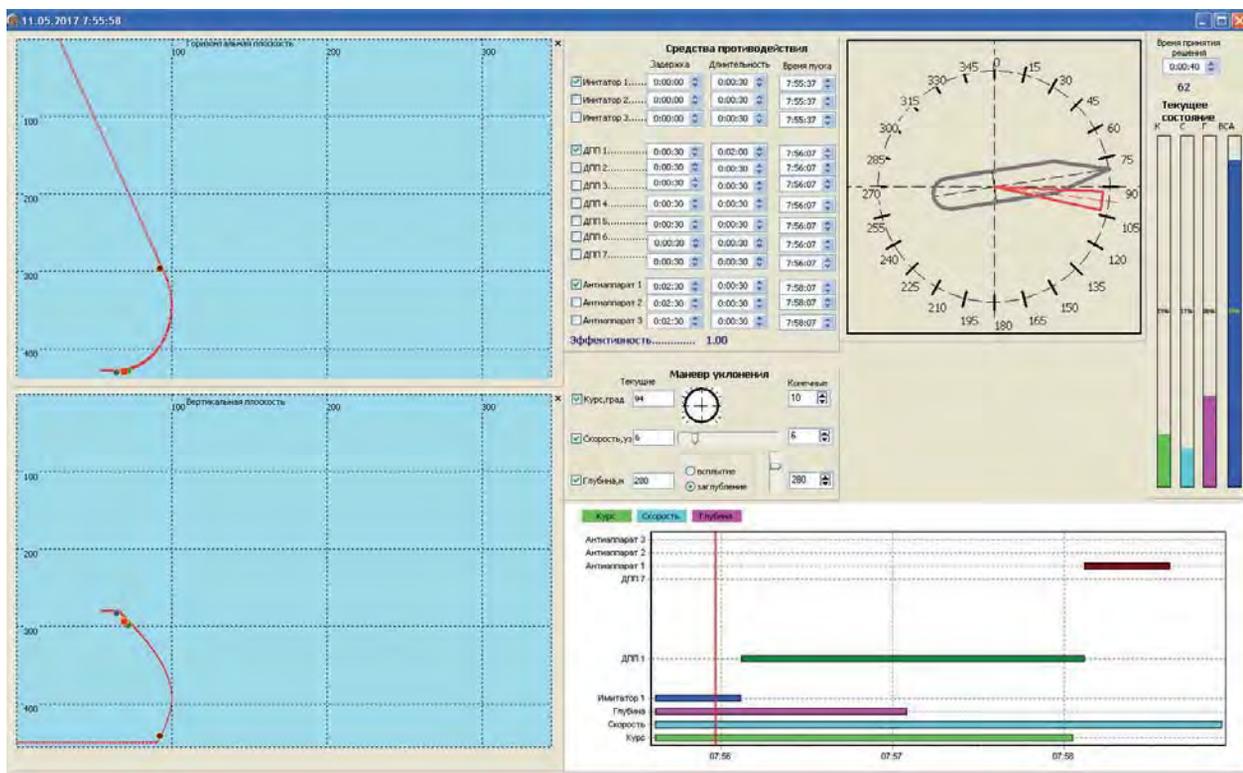
### Описание программной реализации

Для проведения исследований по математической модели была разработана программа, внешний вид главного окна которой представлен на рис. 3.

На вспомогательном экране (рис. 4) показан инструментарий для проведения исследований



■ **Рис. 3.** Интерфейс главного окна программы для проведения исследований  
 ■ **Fig. 3.** Appearance of the main window of the program for research



■ **Рис. 4.** Интерфейс окна программы с инструментарием для оценки эффективности ведения наблюдения в условиях помех  
 ■ **Fig. 4.** Appearance of the window of the program with the tools provided to the researcher for assessing the effectiveness of conducting observations under interference conditions

по оценке эффективности ведения наблюдения за наблюдаемым аппаратом в условиях помех. В инструментарий входят:

— отображение траектории перемещения наблюдателя в ходе выполнения маневра уклонения;

— соотношение времени, затрачиваемого на маневр уклонения наблюдателя по курсу, скорости и глубине, на специальной диаграмме с указанием текущего момента времени;

— количество и перечень используемых наблюдателем средств противодействия высокоскоростному аппарату с указанием рекомендованного момента времени их использования и продолжительности использования;

— временная диаграмма соотношения маневра и функционирования средств противодействия высокоскоростному аппарату;

— эффективность противодействия высокоскоростному аппарату, рассчитанная по определенной методике, описание которой приведено ниже.

Арсенал и количество используемых средств при оценке эффективности определяются с учетом времени, на которое необходимо отвлечь высокоскоростной аппарат от наблюдателя с учетом того, что энергоресурс высокоскоростного аппарата ограничен. Каждое средство «заберет» у высокоскоростного аппарата определенное время на разбор со средством, тем самым расходуя дополнительно его энергоресурс.

Пусть высокоскоростному аппарату, движущемуся со скоростью  $V$ , необходимо время  $T_D$  на преодоление дистанции  $D$ :  $T_D = D/V$ . Пусть запас времени по энергоресурсу высокоскоростного аппарата составляет  $T_m$ . Если  $T_m < T_D$ , то высокоскоростной аппарат не сможет на такой дистанции создавать помеху наблюдателю. Если же  $T_m > T_D$ , то у высокоскоростного аппарата возникает «запас» времени, который необходимо «закрыть» средствами противодействия. Тогда, отвлекаясь на средства противодействия, высокоскоростной аппарат израсходует ресурс, и даже если все средства противодействия преодолеет в соответствии с заложенным в нем интеллектом, ресурса все равно может оказаться недостаточно для того, чтобы сблизиться с наблюдателем на необходимую дистанцию. Промежуток времени  $\Delta t$ , который необходимо заполнить средствами противодействия, определяется выражением

$$\Delta t = T_m - T_D.$$

Если предположить, что в среднем высокоскоростной аппарат тратит время  $t_{c.п}$  на то, чтобы разобраться со средством противодействия и вернуться на позицию создания помехи наблюдателю, то количество средств противодействия определяется отношением

$$N = [\Delta t/t_{c.п}] + 1,$$

где символ  $[\ ]$  означает «целая часть» числа.

Таким образом, инструментарий, представленный на рис. 4, позволяет исследователю изменить порядок применения имеющихся средств противодействия и временные характеристики — задержку начала и продолжительность функционирования.

С использованием разработанной математической модели и ее программной реализации были проведены исследования, в ходе которых выполнялся численный эксперимент. Исследования были направлены на оценку влияния параметров наблюдателя и высокоскоростного аппарата на эффективность сохранения процесса наблюдения.

### Результаты численного эксперимента

В численном эксперименте задействованы два аппарата: наблюдатель и наблюдаемый, — расположенные в точках с координатами  $70.029146701^\circ$  с. ш.,  $29.98280885^\circ$  в. д. и  $70.012483446^\circ$  с. ш.,  $30.06972222^\circ$  в. д. соответственно (см. рис. 3).

При проведении численного эксперимента разыгрывается:

— стартовый курс движения наблюдателя; диапазон разыгрывания  $0^\circ$ – $90^\circ$  относительно наблюдаемого аппарата;

— глубина и угол отворота наблюдателя при выполнении маневра уклонения из диапазонов:

глубина  $20^\circ$ – $450$  м;

угол отворота  $\pm 60^\circ$ .

Стартовую дистанцию «наблюдатель — наблюдаемый аппарат» в каждом испытании считаем величиной постоянной и равной  $3050$  м.

Если высокоскоростной аппарат потерял свою работоспособность в результате действия прибора противодействия, используемого со стороны наблюдателем: израсходовал ресурс или ушел в ложном направлении — испытание считается завершенным.

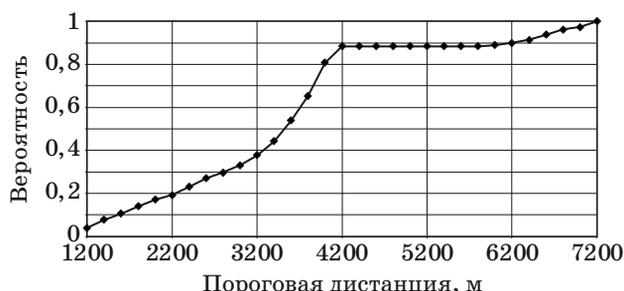
В ходе численного эксперимента проводилась серия испытаний и определялись значения дистанции от наблюдателя до наблюдаемого аппарата в момент, когда помехи от высокоскоростного аппарата преодолевались. Затем полученные в испытаниях дистанции сортировались по возрастанию, формировался диапазон дистанций, ограниченный пороговым значением дистанции, за пределами которой наблюдатель терял контакт с наблюдаемым аппаратом. После сортировки полученных дистанций определялось количество дистанций, попадающих в рассматриваемый диапазон.

На рис. 5 приведена вероятность сохранения контакта наблюдателя с наблюдаемым аппара-

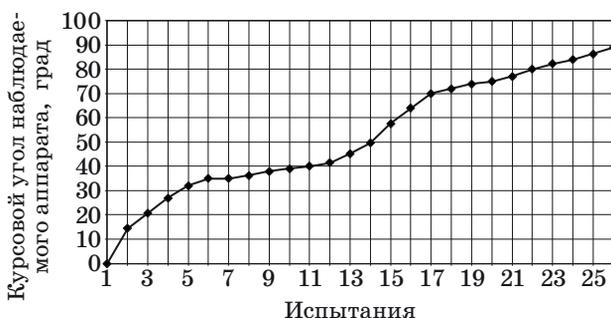
том в зависимости от порогового значения дистанции, при котором контакт еще возможен: по горизонтальной оси отложено пороговое значение дистанции, на которой контакт еще возможен, по вертикальной — вероятность. Среднее время отвлечения составило 235 с, минимальное — 212 с, максимальное — 249 с, среднеквадратическое отклонение составило 13,8 с.

Из рисунка видно, что гарантированное сохранение контакта наблюдается в основном на дистанциях свыше 3800 м. Поэтому на следующем этапе исследований анализировались причины полученных значений дистанции. При проведении исследований исходили из того, что дистанция до наблюдаемого аппарата после преодоления помехи определяется временем, затраченным наблюдателем на устранение помехи. Кроме того, на дистанцию влияние оказывает курс движения наблюдаемого аппарата.

Значения пеленгов, полученные в каждом испытании серии, упорядочены по возрастанию. Из рис. 6 видно, что характер кривой близок к линейной зависимости, что позволяет говорить о равномерном распределении пеленгов в серии испытаний.



■ **Рис. 5.** Вероятность сохранения контакта в зависимости от порогового значения дистанции  
 ■ **Fig. 5.** The probability of maintaining a contact as a function of the distance threshold



■ **Рис. 6.** Изменение пеленга от наблюдателя на наблюдаемый аппарат в зависимости от курса движения наблюдаемого аппарата  
 ■ **Fig. 6.** Bearing change from the observer to the observed device depending on the course of movement of the monitored device

На дистанцию влияние оказывают курс наблюдаемого аппарата и время, затрачиваемое наблюдателем на подавление помехи, создаваемой высокоскоростным аппаратом.

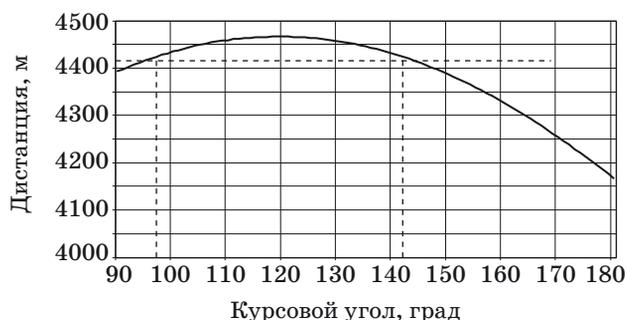
На следующем этапе исследований было проанализировано, существуют ли курсовые углы перемещения наблюдаемого аппарата, которые приводят к прерыванию наблюдения.

Наблюдаемый аппарат мог двигаться произвольным курсом, в том числе «диаметрально» расходясь с наблюдателем. Поэтому для дальнейшего анализа было пересчитано положение наблюдателя к моменту окончания его уклонения от высокоскоростного аппарата.

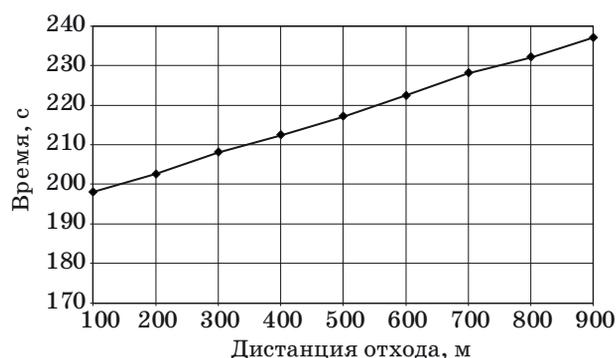
Для этого определялись положение наблюдателя и время, которое он потратил на борьбу с помехой. Далее перебирались курсовые углы и определялось положение наблюдаемого аппарата, в котором он мог оказаться через рассчитанный промежуток времени. Результаты моделирования представлены на рис. 7.

Из рисунка видно, что существует диапазон курсовых углов, при движении с которыми наблюдаемый аппарат выходит из-под наблюдения за то время, пока наблюдатель «разбирается» со скоростным аппаратом. Такой вариант является самым неблагоприятным для наблюдателя, поскольку придется заново вести поиск, а в случае обнаружения — «догонять» наблюдаемого исключительно за счет разности скоростей.

При анализе стратегии поведения скоростного аппарата по преодолению противодействия, созданного наблюдателем, выявлено, что время может зависеть, в частности, от дистанции отхода высокоскоростного аппарата за дрейфующий прибор помех для того, чтобы выйти из шумового поля, в котором невозможно обнаружить наблюдателя. Для этого при фиксированных значениях положения наблюдателя и наблюдаемого аппарата



■ **Рис. 7.** Изменение дистанции от наблюдателя до наблюдаемого в зависимости от курса движения наблюдаемого  
 ■ **Fig. 7.** Changing the distance from the observer to the observed, depending on the course of motion of the observed



■ **Рис. 8.** Зависимость времени отвращения наблюдателя на скоростной аппарат от дистанции отхода скоростного аппарата за дрейфующий прибор помех

■ **Fig. 8.** Dependence of the observer's distraction time on the velocity apparatus from the distance of the departure of the velocity apparatus for the drifting interference device

та перебирались дистанции отхода высокоскоростного аппарата от 100 до 900 м.

Результаты влияния дистанции отхода скоростного аппарата за дрейфующий прибор помех на время отвращения наблюдателя на скоростной аппарат приведены на рис. 8.

Видно, что с увеличением дистанции отхода высокоскоростного аппарата за прибор помех происходит увеличение времени, затрачиваемого наблюдателем на преодоление интеллектуальной помехи, вызванной поведением высокоскоростного аппарата.

## Литература

1. Ким Д. П. Методы поиска и преследования подвижных объектов. — М.: Наука, 1989. — 336 с.
2. Мартынова Л. А., Шебалов А. Н. Условия взаимодействия объектов в дифференциальной игре преследования // Проблемы математического моделирования и разработка САПР для судостроения: науч.-техн. сб. (труды). — Л.: ЛКИ, 1990. С. 55–60.
3. Понтрягин Л. С. Линейные дифференциальные игры. I // Докл. АН СССР. 1967. Т. 174. № 6. С. 1278–1281.
4. Понтрягин Л. С. Линейные дифференциальные игры. II // Докл. АН СССР. 1967. Т. 175. № 4. С. 764–767.
5. Абрамов Н. С., Хачумов В. М. Моделирование проводки по маршруту беспилотного летательного аппарата как задачи преследования цели // Авиакосмическое приборостроение. 2013. № 9. С. 9–22.
6. Мельц И. О., Сурженко А. С. Игровая задача преследования–уклонения для трех участников // Уч. зап. ЦАГИ. 2005. Т. XXXVI. № 3–4. С. 92–102.
7. Дзюбенко Г. Ц., Пшеничный Б. Н. Дискретные дифференциальные игры с запаздыванием информации // Кибернетика. 1972. Т. 8. № 6. С. 65–71.
8. Сатимов Н., Азамов А. Нелинейные дискретные игры убегающего // Кибернетика. 1976. Т. 12. № 4. 1976. С. 70–74.
9. Петров Н. Н. Задача группового преследования в классе импульсных стратегий преследователей // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2009. Т. 48. № 2. С. 38–44
10. Ухоботов В. И., Зайцева О. В. Одна задача импульсного преследования при ограниченной скорости убегающего // Вестник Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2010. № 2 (178). Вып. 11. С. 29–32.
11. Isaacs R. Differential Games: A Mathematical Theory with Applications to Warfare and Pursuit, Control and Optimization. — N. Y.: John Wiley & Sons, 1965. — P. 349–350.
12. Пацко В. С., Турова В. Л. Игра «Шофер-убийца» и ее модификации // Вестник Удмуртского универ-

Таким образом, по результатам проведенных исследований показано, что наблюдаемый аппарат может выбрать стратегию (курс или параметры — дистанцию отхода), которая позволяет ему оторваться от наблюдателя и тем самым прервать наблюдение за ним со стороны наблюдателя.

## Заключение

Для решения задачи подводного наблюдения в условиях применения против наблюдателя интеллектуальных помех в работе рассмотрены варианты поведения наблюдателя для сохранения контакта с наблюдаемым аппаратом. Для проведения сопоставления полученных результатов предложен показатель эффективности наблюдения — вероятность сохранения контакта.

Для расчета вероятности сохранения контакта разработана математическая модель, учитывающая особенности поведения наблюдателя, наблюдаемого аппарата, а также аппаратов, создающих помехи наблюдателю и скоростному объекту, используемому наблюдаемым аппаратом в качестве помехи наблюдателю.

Результаты моделирования позволили прогнозировать возможность сохранения контакта и выбирать тактику поведения, обеспечивающую эффективное наблюдение.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-08-00666).

- ситета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2008. Вып. 2. С. 105–110.
13. Гарднер М. Оптимальные стратегии для игр с двумя участниками // Математические новеллы. — М.: Мир, 1974. — С. 214–230.
  14. Гмурман В. Е. Теория вероятности и математическая статистика. — М.: Высш. шк., 2000. — 305 с.
  15. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. — М.: Наука, 1978. — 400 с.
  16. Мартынова Л. А. Имитационная модель оценки эффективности функционирования АНПА // Тр. Междунар. конф. по судостроению и океанотехнике, Санкт-Петербург, 6–8 июня 2016 г.; сб. ст. — СПб.: СПбГМТУ, 2016. С. 455–469.
  17. Мартынова Л. А., Розенгауз М. Б. К вопросу о надежности автономного необитаемого подводного аппарата с мультиагентной архитектурой системы управления // Информационно-управляющие системы. 2016. № 5. С. 25–34. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.5.25
  18. Мартынова Л. А., Машошин А. И., Пашкевич И. В. Подходы к оценке эффективности автономного необитаемого подводного аппарата // Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2016): материалы конф., Санкт-Петербург, 4–6 октября 2016 г. — СПб.: Концерн «Электроприбор», 2016. С. 205–209.
  19. Мартынова Л. А., Машошин А. И. Особенности оценки эффективности функционирования автономных необитаемых подводных аппаратов в нештатных ситуациях // Экстремальная робототехника: тр. Междунар. науч.-техн. конф. — СПб.: АПАПринт, 2016. С. 86–91.
  20. Безрук Г. Г., Мартынова Л. А. Оценка эффективности образцов робототехнических комплексов в условиях противодействия // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. 2016. № 11–12 (101–102). С. 45–49.

UDC 519.87

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.1.31

**Underwater Observation under Intellectual Interference**Martynova L. A.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, martynowa999@bk.ru<sup>a</sup>Concern CSRI Elektropribor, JSC State Research Center of Russia, 30, Malaya Posadskaya St., 197046, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Autonomous uninhabited submersibles perform a variety of tasks, including monitoring other autonomous uninhabited submersibles which are of interest, for example commercially. The task of an observing device is to maintain a constant contact with the observed object and to obtain the information about its coordinates and motion parameters. At the same time, the observed device tries to get rid of the surveillance, for which it uses an intellectual interference in the form of a high-speed apparatus. The interference is intelligent because it can recognize the countermeasures used against it by the observer and to reduce their influence by a chosen strategy of its behavior. So far, in the problems of search or pursuit of an object, potentially under an interference, the behavior of the interference has never been intellectual. **Purpose:** Evaluating the influence of an intellectual interference behavior upon the possibility to maintain the contact with a monitored device under the conditions when a number of the interference parameters and behavioral strategy are not determined in advance. **Methods:** The efficiency indicator calculation is based on the method of statistical tests (the Monte Carlo method). **Results:** A tactical episode was formed of observing an object which uses an intellectual disturbance. A strategy has been developed for the observer to use countermeasures, along with a strategy for the behavior of a high-speed device to reduce the influence of the countermeasures. To assess the impact, performance indicators were defined, and a mathematical model developed for their calculation. The developed software implementation of the mathematical model made it possible to conduct numerical experiments which allowed us to evaluate the influence of an intellectual interference on the possibility of keeping the contact between the observer and the monitored device. **Practical relevance:** The results can be used for planning an observer's behavior strategy under interference, for choosing technical solutions in order to ensure monitoring an object under interference, or for choosing a strategy of anti-interference measures against the monitored device.

**Keywords** — Autonomous Uninhabited Submersible, Mathematical Modeling, Method of Statistical Tests, Intellectual Interference.

**Citation:** Martynova L. A. Underwater Observation under Intellectual Interference. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 1, pp. 31–41 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.1.31

**References**

1. Kim D. P. *Metody poiska i presledovaniia podvizhnykh ob'ektov* [Methods of Searching and Prosecuting Mobile Objects]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 336 p. (In Russian).
2. Martynova L. A., Shebalov A. N. Conditions of Interaction of Objects in a Differential Game of Pursuit. In: *Problemy matematicheskogo modelirovaniia i razrabotka SAPR dlia sudostroeniia* [Problems of Mathematical Modeling and Development of CAD for Shipbuilding]. Leningrad, Leningradskii korablestroitel'nyi institute Publ., 1990. Pp. 55–60 (In Russian).
3. Pontryagin L. S. Linear Differential Games. Part I. *Doklady AN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1967, vol. 174, no. 6, pp. 1278–1281 (In Russian).
4. Pontryagin L. S. Linear Differential Games. Part II. *Doklady AN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1967, vol. 175, no. 4, pp. 764–767 (In Russian).
5. Abramov N. S., Khachumov M. V. Air Route Simulation of Unmanned Aerial Vehicles as the Pursuit-Evasion Problem. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace Instrument-Making], 2013, no. 9, pp. 9–22 (In Russian).
6. Melts I. O., Surzhenko A. S. Game Problem of Prosecution of Deviation for Three Participants. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2005, vol. XXXVI, no. 3–4, pp. 92–102 (In Russian).
7. Dzyubenko G. T., Pshenichny B. N. Discrete Differential Games with Time Lag of Information. *Kibernetika* [Cybernetics], Kiev, 1972, vol. 8, no. 6, pp. 65–71 (In Russian).

8. Satimov N., Azamov A. Nonlinear Discrete Games of Evasion. *Kibernetika* [Cybernetics], Kiev, 1976, vol. 12, no. 4, pp. 70–74 (In Russian).
9. Petrov N. N. A Problem of Group Pursuit in the Class of Impulse Strategies of Pursuers. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2009, vol. 48, no. 2, pp. 199–205. doi:10.1134/S106423070902004X
10. Ukhobotov V. I., Zayceva O. V. About One Problem of Impulse Pursuit at the Limited Velocity of the Escaping. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika"* [Bulletin South Ural State University. Series "Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics"], 2010, no. 2 (178), iss. 11, pp. 29–32 (In Russian).
11. Isaacs R. *Differential Games: A Mathematical Theory with Applications to Warfare and Pursuit, Control and Optimization*. N. Y., John Wiley & Sons, 1965. Pp. 349–350.
12. Patsko V. S., Turova V. L. Homicidal Chauffeur Game and its Modifications. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Komp'yuternye nauki*, 2008, no. 2, pp. 105–110 (In Russian).
13. Gardner M. *Optimal'nye strategii dlia igr s dvumia uchastnikami*. In: *Matematicheskie novelly* [Optimal Strategies for Games with Two Participants. In: Mathematics Games]. Moscow, Mir Publ., 1974. Pp. 214–230 (In Russian).
14. Gnurman V. E. *Fundamentals of Probability Theory & Mathematical Statistics Hardcover*. Piiffe Books Ltd, 1968.
15. Buslenko N. P. *Modelirovanie slozhnykh sistem* [Modeling of Complex Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 400 p. (In Russian).
16. Martynova L. A. Imitation Model for Evaluation of the Operational Efficiency of AUV. *Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii po sudostroeniiu i okeanotekhnike* [Proc. of the Intern. Conf. on Naval Architecture and Ocean Engineering], June 6–8, 2016, Saint-Petersburg, Russia, 2016, pp. 455–469 (In Russian).
17. Martynova L. A., Rozengauz M. B. Reliability of an Autonomous Underwater Vehicle with a Multiagent Control System. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 5, pp. 25–34 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.5.25
18. Martynova L. A., Mashoshin A. I., Pashkevich I. V. Approaches to Assessing the Effectiveness of an Autonomous Uninhabited Underwater Vehicle. *Materialy konferentsii "Upravlenie v morskikh i aerokosmicheskikh sistemakh (UMAS-2016)"* [Proc. of the Conf. "Management in Marine and Aerospace Systems" (UMAS-2016)], October 4–6, 2016, Saint-Petersburg, pp. 205–209 (In Russian).
19. Martynova L. A., Mashoshin A. I. Features of Evaluating the Performance of Autonomous Underwater Vehicle in Emergency Situations. *Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Ekstremal'naiia robototekhnika"* [Proc. of Intern. Scientific and Technological Conf. "Extreme Robotics"], November 24–25, 2016, Saint-Petersburg, Russia, 2016, pp. 86–91 (In Russian).
20. Bezruk G. G., Martynova L. A. Evaluation of Samples Robotic Systems in the Face of Opposition. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16* [Military Enginery. Series 16], 2016, no. 11–12 (101–102), pp. 45–49 (In Russian).

**Научный журнал**  
**«ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ»**  
 выходит каждые два месяца.

Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 6000 рублей, для подписчиков стран СНГ — 6600 рублей, включая НДС 18%, таможенные и почтовые расходы.

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогу:

«Роспечать»: № 15385 — полугодовой индекс,

а также через посредство подписных агентств:

«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05,

эл. почта: [press@crp.spb.ru](mailto:press@crp.spb.ru), [zajavka@crp.spb.ru](mailto:zajavka@crp.spb.ru),

сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

Москва, тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47,

эл. почта: [export@periodicals.ru](mailto:export@periodicals.ru), сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: [podpiska@delpress.ru](mailto:podpiska@delpress.ru),

сайт: <http://delpress.ru/contacts.html>

«Коммерсант-Курьер»

Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, эл. почта: [kazan@komcur.ru](mailto:kazan@komcur.ru),

сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan/>

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«BTL» (Узбекистан)

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html> и др.

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья)

вы можете подписаться на сайтах НЭБ: <http://elibrary.ru>;

РУКОНТ: <http://www.rucont.ru>; ИВИС: <http://www.ivis.ru/>

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2016 гг.

в свободном доступе на сайте журнала (<http://www.i-us.ru>),

НЭБ (<http://www.elibrary.ru>)

и Киберленинки (<http://cyberleninka.ru/>

[journal/n/informatsionno-upravlyayushchiesistemy](http://journal/n/informatsionno-upravlyayushchiesistemy)).