

УДК 629.58 + 004.942

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВСТРЕЧИ АНПА С ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ПОДВОДНЫМ ОБЪЕКТОМ

Л.А. Мартынова, А.А. Павлов (Санкт-Петербург)

### Введение

Современное развитие морской робототехники привело к возможности решения с ее использованием широкого круга задач [1,2]. Одной из таких задач является встреча АНПА с высокоскоростным подводным необитаемым объектом (ВПНО), движущимся из точки А в точку Б. Необходимость встречи может быть обусловлена доставкой и передачей конфиденциальной информации, дозаправки на ходу (по аналогии с магистральными самолетами дальней авиации) движущимися на высокой скорости АНПА и т.д. Для решения перечисленных и подобных задач требуется сближение с ВПНО на минимально возможную дистанцию. Существующие подходы к решению задачи о встрече движений морских объектов [3-9] основаны на выработке алгоритмов системы управления АНПА [10-11] и предполагали существенно меньшую скорость объекта встречи по сравнению с собственной скоростью АНПА и значительно большую дистанцию сближения. В рассматриваемой задаче такие подходы не могут быть использованы из-за существенно меньшей дистанции сближения. В этом случае критичными являются погрешности определения параметров ВПНО: пеленг, дистанция – как на этапе его поиска, так и на этапе сопровождения в процессе сближения.

Определение требований по точностным характеристикам параметров ВПНО (курсового угла и угла места) основными системами АНПА – гидроакустическим комплексом (ГАК), навигационным комплексом (НК), движительно-рулевым комплексом (ДРК) – целесообразно проводить на основе оценки эффективности функционирования АНПА [10, 11]. Для оценки эффективности необходимо выполнение имитационного моделирования [12-14] поведения АНПА при рассмотрении различных тактических эпизодов.

Применяемый традиционно для оценки эффективности морских объектов метод статистических испытаний [15, 16] потребовал существенного пересмотра идеологии математической модели оценки эффективности встречи быстроходных подводных объектов в части:

- моделирования поведения целевой точки Б, в которую направлено движение ВПНО;
- моделирования погрешностей определения пеленга и дистанции до ВПНО средствами ГАК для оценки их влияния на эффективность функционирования АНПА;
- моделирования погрешностей определения местоположения ВПНО НК для оценки их влияния на эффективность функционирования АНПА;
- моделирования погрешностей движения АНПА, вызванных особенностями работы ДРК, для оценки их влияния на эффективность функционирования АНПА;
- синхронизации гидроакустических процессов АНПА и ВПНО;
- моделирование изменения положения и размеров области возможного положения (ОВП) ВПНО и ее размеров.

Для обоснования требований к АНПА необходимо проведение численных экспериментов поведения АНПА при выполнении поставленной задачи сближения с ВПНО на дистанцию в пределах заданной. Выполнение требований определяется эффективностью решения АНПА поставленной задачи встречи с ВПНО. Для определения показателя эффективности ввиду неопределенности параметров движения

ВПНО (курс, скорость, глубина) целесообразно использовать метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Для реализации метода статистических испытаний потребовалась разработка математической имитационной модели поведения АНПА в заданном тактическом эпизоде.

### 1. Постановка задачи

Рассматривается следующий тактический эпизод: ВПНО движется в направлении конечной точки своего маршрута – точки Б, которая в общем случае может медленно перемещаться из-за течений, дрейфа и т.д. Имеется АНПА, который должен встретиться с ВПНО для решения поставленной перед АНПА задачи. На борту АНПА имеются системы: ГАК для определения пеленга и угла места ВПНО, НК для определения углов ориентации и координат собственного положения и ДРК для движения в заданном направлении по вертикали и горизонтали. Все перечисленные системы вырабатывают указанные параметры с некоторыми погрешностями. Функционирование АНПА состоит из пяти этапов: предстартовой подготовки; старта; маршевого хода в ОВП ВПНО; поиска ВПНО; сопровождения ВПНО вплоть до сближения с ним на дистанцию в пределах заданной.

Необходимо разработать имитационную модель функционирования АНПА и его систем так, чтобы определить требования по точности определения пеленга дистанции и выведения АНПА к ВПНО на дистанцию в пределах заданной.

### 2. Выбор показателя эффективности АНПА и метода его расчета

В качестве показателя эффективности целесообразно использовать вероятность обнаружения ВПНО и вероятность сближения с ВПНО на дистанцию в пределах заданной. Будем полагать, что системы АНПА обеспечивают точностные характеристики в случае, если показатель эффективности превышает по вероятности некоторый заранее заданный уровень, например, 0,8.

Для расчета критерии эффективности – вероятности сближения АНПА с ВПНО – использован метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). В каждом испытании потребуется разыгрывать неизвестные параметры ВПНО по равномерному закону из диапазона возможных значений. Начальными параметрами ВПНО являются его курс, скорость, глубина и направление излучения гидроакустической станции.

После того, как «проигран» многократно тактический эпизод, то есть прошла так называемая серия испытаний, определяется вероятность  $P_{BM}$  сближения АНПА с ВПНО как отношение результативных испытаний  $N_0$  к общему количеству испытаний  $N$ :

$$\dots \quad P_{BM} = \frac{N_0}{N} \quad (1)$$

Испытание считается результативным, если произошло сближение АНПА с ВПНО. Испытание считается завершенным, если произошло сближение АНПА с ВПНО на дистанцию в пределах заданной.

Количество испытаний  $N$  в серии определяется, исходя из ожидаемого значения вероятности  $P_{BM}$  выполнения АНПА задачи – сближения с объектом. В связи с этим для определения ожидаемого значения вероятности сближения с ВПНО на первом этапе задавалось количество испытаний, равное 100. Полученные результаты вероятности  $P_{BM}$  сближения с ВПНО подставлялись в выражение (1), и определялось необходимое количество испытаний в серии по формуле:

$$N = t_{\alpha}^2 \frac{P_{BM}(1 - P_{BM})}{\varepsilon^2},$$

где  $t_{\alpha}$  – коэффициент Стьюдента;  $\varepsilon$  – допустимое значение относительной ошибки.

### 3. Подход к формированию требований к системам АНПА

Результатом применения метода статистических испытаний является множество  $U^* = \{\bar{u}_i, i \in N\}$  таких требований к системам АНПА, при которых вероятность успешного сближения с ВПНО  $P(U^*)$  не меньше заданной вероятности  $P_{need}$  сближения ВПНО:

$$P(U^*) = \min P(U), P(U) \geq P_{need}$$

Решение  $\bar{u}_i = (u_{dist}, u_{pel\_hor}, u_{pel\_ver}, u_{orient\_angle}, u_{drk\_time}, u_{drk\_prec})$  состоит из следующих компонентов:

- $u_{dist}$  – дистанции обнаружения ВПНО АНПА;
- точности пеленгования ВПНО в горизонтальной  $u_{pel\_hor}$  и вертикальной  $u_{pel\_ver}$  плоскостях;
- точности определения углов ориентации  $u_{orient\_angle}$  АНПА с использованием навигационной системы;
- необходимого времени  $u_{drk\_time}$  и точности  $u_{drk\_prec}$  отработки ДРК команд, вырабатываемых системой управления АНПА.

Показатель  $P(\bar{u}_i)$  качества полученного решения  $\bar{u}_i \in U$  определяется выражением:

$$P(\bar{u}_i) = 1 - \prod_{j \in N^u} (P(\bar{u}_{ij})),$$

где  $P(\bar{u}_{ij})$  – вероятность успешного сближения ВПНО при минимальных (нулевых) значениях компонент вектора решения с номерами  $j \neq k, k \in N^u$  и заданным (ненулевым) значением компоненты вектора решения с номером  $j = k$ .

При поиске решений  $U^*$  накладываются следующие ограничения:

- значения вектора  $\bar{u}_i$  точностных характеристик АНПА не должны быть меньше заданных перед началом моделирования значений, описанных вектором  $\bar{u}_{(min)}$  и не больше значений, описанных вектором:

$$\bar{u}_{(min)} \leq \bar{u}_i \leq \bar{u}_{(max)}.$$

- время  $t_{test}$  проведения каждого испытания не должно превышать заданного предельного значения времени  $t_{limit}$  проведения одного испытания, то есть:

$$t_{test} \leq t_{(limit)}.$$

### 4. Имитационная модель оценки эффективности

Целью моделирования на первом этапе исследований является определение параметров гидроакустического комплекса (ГАК) АНПА для дальнейшего его проектирования. По результатам моделирования получены требования по следующим параметрам:

- по ГАК: угол сектора, дальность сектора, количество направлений и углы змейки в вертикальной и горизонтальной плоскостях, погрешности определения пеленга и угла места;
- по НП: погрешности определения углов ориентации АНПА по крену, дифференту, рысканию;
- по ДРК – погрешности отработки требуемых параметров движения по курсу, дифференту, скорости, глубине, а также – задержки при изменении параметров движения АНПА.

В связи с этим при проведении численных экспериментов основной задачей является определение параметров сектора обзора диаграммы направленности ГАК. Тогда по полученным данным разработчики ГАК, НК и ДРК смогут оценить возможность достижения требуемых параметров. Эксперимент направлен на выявление минимально необходимых секторов в различных условиях.

При определении параметров учитывалось, что на этапе поиска ширина осматриваемой ГСО полосы определяется шириной змейки АНПА при секторном поиске и амплитудой движения по змейке, которая определяется акустическим циклом. На этапе сопровождения ВПНО требовалось перекрыть полосу вероятного движения ВПНО с учетом смещения ВПНО при движении в направлении точки Б.

Для определения дальности и углов сектора обзора, а также допустимых погрешностей в ходе численного эксперимента осуществлялся перебор ширины полосы обзора и угла сектора обзора.

Проведение численного эксперимента проходило в следующей последовательности: сначала рассматривался идеальный вариант с нулевыми погрешностями, в ходе которого определялись минимально необходимые параметры сектора. По результатам моделирования идеального случая с нулевыми погрешностями по результатам численного эксперимента определены минимально необходимые полоса поиска и угол сектора обзора. Этот вариант был принят за эталон, и результаты последующих исследований по влиянию погрешностей определения пеленга и угла места, а также сближения на дистанцию в пределах заданной, определялись по результатам сравнения по эталонным результатам.

### 5. Алгоритмы имитационного моделирования АННА и других объектов

Моделирование поведения АНПА включает в себя необходимость моделирования движения точки Б и ВПНО, а также моделирование обнаружения ВПНО, выработки параметров движения ВПНО в зависимости от движения точки Б и АНПА в зависимости от движения ВПНО.

Моделирования перемещения точки Б осуществлялось с использованием выражений:

$$X_{Bi} = X_{Bi-1} + V_B \cdot \Delta t \cdot \sin(Q_B) \cdot \cos(\Psi_B)$$

$$Z_{Bi} = Z_{Bi-1} + V_B \cdot \Delta t \cdot \cos(Q_B) \cdot \cos(\Psi_B)$$

$$Y_{Bi} = Y_{Bi-1} + V_B \cdot \Delta t \cdot \sin(\Psi_B)$$

где  $X_{Bi}, Y_{Bi}, Z_{Bi}$  – координаты положения точки Б в  $i$ -ый момент времени;

$\Delta t$  – временной интервал, равный длительности такта имитации;

$Q_B$  – курс движения точки Б;

$\Psi_B$  – дифферент;

$V_B$  – скорость движения точки Б.

Моделирование движения ВПНО осуществлялось с использованием выражений:

$$X_{Oi} = X_{Oi-1} + V_O \cdot \Delta t \cdot \sin(Q_O) \cdot \cos(\Psi_T)$$

$$Z_{Oi} = Z_{Oi-1} + V_O \cdot \Delta t \cdot \cos(Q_O) \cdot \cos(\Psi_T)$$

$$Y_{Oi} = Y_{Oi-1} + V_O \cdot \Delta t \cdot \sin(\Psi_T)$$

где  $X_{Oi}, Y_{Oi}, Z_{Oi}$  – координаты положения точки Б в  $i$ -ый момент времени;

$Q_O$  – курс движения ВПНО, определяется пеленгом на точку Б;

$\Psi_T$  – дифферент;

$V_O$  – скорость движения ВПНО.

Курс движения ВПНО определялся пеленгом точки Б:

$$Pel_o = -\arctan\left(\frac{X_B - X_o}{Z_B - Z_o}\right)$$

$$Q_o = -\arctan\left(\frac{X_o - X_B}{Z_o - Z_B}\right) + \sigma_o$$

где  $X_{Bi}, Y_{Bi}, Z_{Bi}$  – координаты положения точки Б в  $i$ -ый момент времени;

$\sigma_o$  – ошибка пеленга ВПНО, определяемого ГАК ВПНО, учитывается при определении генерального направления движения АНПА.

Дифферент определяется углом места носителя:

$$UM = \arctan \frac{Z_B - Z_o}{\sqrt{(X_B - X_o)^2 + (Y_B - Y_o)^2}},$$

Период времени  $\Delta t$  движения ВПНО в направлении точки Б определялся длительностью акустического цикла, которая определяется выражением:

$$\Delta o = 2D_{istO}/V_o,$$

где  $D_{istO}$  – дистанция «ВПНО – точка Б» в текущий момент времени.

Моделирование движения АНПА осуществлялось с использованием выражений:

$$X_{Di} = X_{Di-1} + V_D \cdot \Delta t \cdot \sin(Q_D + Q_{zm}) \cdot \cos(\psi_I)$$

$$Z_{Di} = Z_{Di-1} + V_D \cdot \Delta t \cdot \cos(Q_D + Q_{zm}) \cdot \cos(\psi_I)$$

$$Y_{Di} = Y_{Di-1} + V_D \cdot \Delta t \cdot \sin(\psi_I)$$

где  $Q_{zm}$  – курс АНПА при движении по прямой или по змейке: движение по змейке осуществляется на поисковом участке, движение по прямой – на участке сопровождения после обнаружения ВПНО. Предусматривается вариант поисковой прямолинейной траектории;

$Q_D$  – генеральное направление движения АНПА (оно совпадает с пеленгом на ВПНО).

$\psi_I$  – дифферент;

$V_D$  – скорость движения носителя.

Для определения  $Q_{zm}$  при движении по змейке вводится счетчик циклов  $i_{cycl}$ , и текущему значению индекса последовательно присваиваются значения из диапазона индексов углов сканирования. По индексу угла  $Q_{zm}$  присваивается значение, соответствующее значению угла змейки:  $Q_D = \alpha i_{cycl}$ , где  $\alpha$  – угол между направлениями змейки.

Длительность акустического цикла, которому соответствует время движения АНПА в одном из направлений змейки, определяется выражением:

$$\Delta_D = 2R_a/V_{zm};$$

где  $R_a$  – текущая дальность обнаружения АНПА ВПНО.

Курс движения АНПА определялся пеленгом ВПНО:

$$Pel_D = -\arctan\left(\frac{X_D - X_o}{Z_D - Z_o}\right) + \sigma_D,$$

где  $\sigma_D$  – ошибка пеленга ВПНО, определяемого ГАК АНПА, и углом места ВПНО:

$$UM = \arctan \frac{Z_o - Z_D}{\sqrt{(X_o - X_D)^2 + (Y_o - Y_D)^2}},$$

где  $X_o, Y_o, Z_o$  – координаты ВПНО;

$X_D, Y_D, Z_D$  – координаты АНПА.

Моделирование изменения границы ОВП ВПНО определялось исходя из рассмотрения варианта встречного движения ВПНО:

$$X_{OWP} = X_O + V_O \cdot \sin Q_O \cdot \cos \psi_O \cdot \Delta t;$$

$$Y_{OWP} = Y_O - V_O \cdot \cos Q_O \cdot \cos \psi_O \cdot \Delta t.$$

где

$X_O, Y_O$  – координаты ВПНО в начальный момент времени.

$\Delta t$  – период времени сближения АНПА с ВПНО при встречном их движении.

Дистанция между АНПА и ВПНО определялась выражением:

$$D_{BD} = \sqrt{(X_D - X_O)^2 + (Y_D - Y_O)^2 + (Z_D - Z_O)^2}.$$

Радиус ОВП определялся выражением:

$$R_{OWP} = D_{BD} - \sqrt{(X_{OWP} - X_O)^2 + (Y_{OWP} - Y_O)^2} + Ra.$$

Сближение на маршевом ходу АНПА с ВПНО происходит до тех пор, пока оставшаяся до цели дистанция не станет меньше радиуса ОВП.

Обеспечение независимости моделирования движения ВПНО и АНПА необходимо в связи с тем, что при моделировании движения объектов и событий часть из них происходит независимо, и, в то же время, при происхождении этих событий необходимо иметь информацию о взаимном положении объектов. Так, акустические циклы ВПНО и АНПА разные по длительности, и они не кратны между собой; на догонной траектории в ходе сопровождения обнаруженного ВПНО дистанция постоянно сокращается, и при этом в процессе сокращения дистанции необходимо определение взаимного положения ВПНО и АНПА; при моделировании временной задержки запаздывания отклика ДРК на переданные команды и инерционности разворота АНПА потребовалось моделирование задержки в выполнении команды.

Моделирование обнаружения объекта гидроакустической системой необходимо в следующих случаях:

- при обнаружении ВПНО АНПА, так как в этом случае ВПНО меняет направление движения от поискового на сопровождение точки Б, двигаясь в направлении пеленга точки Б;

- при обнаружении АНПА ВПНО, так как после этого АНПА переходит в режим сопровождения обнаруженной ВПНО, двигаясь по пеленгу на нее;

- при сопровождении обнаруженной ВПНО происходит контрольная оценка обнаружения, и только затем – оценка сближения на заданную дистанцию.

Алгоритм оценки попадания объекта в сектор обзора формализован задачей попадания объекта в конус, угол при вершине которого соответствует углам секторов обзора в вертикальной и горизонтальной плоскостях гидроакустической системы АНПА, а высота – дальности обнаружения объекта.

Объект считается обнаруженным гидроакустическим сигналом, если объект геометрически попадает в пределы конуса обзора.

После обнаружения происходит переход на сближение, при котором имитировалось:

- обнаружение ВПНО, то есть попадание ВПНО в конус;

- в случае обнаружения ВПНО – оценка расстояния от АНПА до ВПНО, и если оно меньше заданного, принимается решение о сближении с ВПНО на дистанцию в пределах заданной.

## 6. Условия проведения и результаты численного эксперимента

В ходе проведения численного эксперимента рассчитывались вероятности обнаружения и сближения с ВПНО на дистанцию в пределах заданной в зависимости от погрешности определения пеленга АНПА – ВПНО, углов ориентации АНПА,

погрешности и задержки обработки ДРК команд системы управления. Численные эксперименты проводились для различных углов сектора обзора зоны обнаружения ГАК АНПА и различных дальностей обнаружения ВПНО ГАК АНПА.

На рисунке 1 приведены фрагменты тактического эпизода в ходе моделирования. Желтой линией изображено положение границы ОВП, синей линией – границы сектора обнаружения ВПНО, красной линией – границы сектора обзора АНПА.



Рис. 1 – Отображение на экране ПК результатов моделирования

Из рисунка 1 видно, что из-за сопровождения ВПНО на точку Б сектора ВПНО недостаточно, ВПНО оказывается пропущенным. При расширении сектора обзора вероятность увеличилась.

Результаты численных экспериментов показали, что:

- влияние каждой из погрешностей оказалось незначительным, и практически не зависимым от источника погрешности; зависимость вероятности приведена на рисунке 2;

- при больших погрешностях (около  $10^{\circ}$ - $15^{\circ}$  градусов ГАК, или НК, или ДРК) увеличение угла размера сектора обзора ГАК не оказывает влияния, так как не позволяет перекрыть ширину полосы обзора, необходимую для обнаружения и сопровождения при сближении ВПНО;

- по сравнению с влиянием погрешностей к данным систем АНПА более значительное влияние на эффективность сближения с ВПНО оказывают задержки ДРК, так как ДРК не успевает оперативно обработать команды системы управления АНПА для выхода к точке сближения с ВПЛ в пределах заданной дистанции;

- несмотря на незначительное влияние погрешностей каждой из систем на эффективность АНПА (рисунок 2), совокупность погрешностей приводит к существенному влиянию на эффективность АНПА. Так, даже при погрешности каждой системы, приводящей по отдельности к вероятности 0,9, в совокупности приводит к вероятности 0,53, что недопустимо.

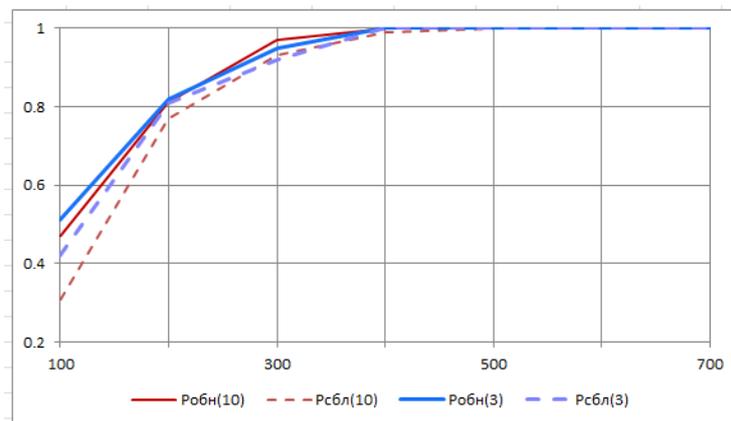


Рис. 2 – Зависимость вероятностей обнаружения и сближения с ВПНО – от дальности обнаружения ГАК

В связи с этим по результатам исследований и численных экспериментов были определены предельные значения каждой из систем АНПА и ее составляющих. Для этого проведен анализ сочетания вероятностей, обеспечивающих заданный критерий эффективности АНПА. На рисунке 3 приведены результаты допустимых значений вероятности каждой из систем АНПА, обеспечивающих превышение заданного критерия эффективности АНПА.

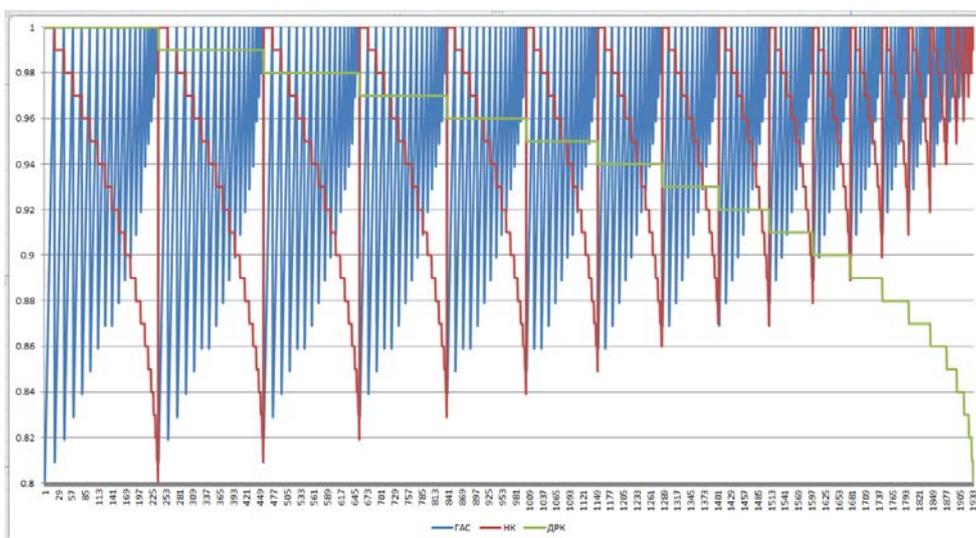


Рис. 3 – Результаты моделирования

Из рисунка 3 видно, что изменение вероятности происходит в диапазоне от 0,8 до 1,0. Соответственно, для обеспечения вероятности 1,0 все ее составляющие должны быть 1,0; для обеспечения 0,8 составляющие должны находиться в диапазоне 0,87 до 0,99.

Результаты моделирования позволяют определить требования к погрешностям систем АНПА. Так, например, пусть погрешности данных, вырабатываемых НК, обеспечивает вероятность 0,97, тогда по графику определяем требования по вероятности к другим системам – ГАК и ДРК. В рассматриваемом в качестве примера варианте погрешности ГАК и ДРК должны обеспечивать вероятности на уровнях 0,89 и 0,93 соответственно, или 0,87 и 1,0. Далее, исходя из требуемых вероятностей, по зависимостям вероятности от угла сектора и его дальности (рисунок 1), определяются

требования к углу сектора обзора и дальности обнаружения ГАК АНПА. Так, при выборе варианте с вероятностью 0,89 и 0,93 определяем по графикам, что такие вероятности обеспечиваются при дальности 400 м и угле сектора обзора ГАК 15°, или дальности 300 м и секторе 30°, или 45°, или радиус 200 м с углом 60°.

### **Заключение**

Предложенный подход к определению требований к системам АНПА основан на оценке эффективности АНПА при различных погрешностях данных, вырабатываемых системами АНПА. Для оценки эффективности методом статистических испытаний (метода Монте-Карло) разработана имитационная модель функционирования АНПА и объектов, оказывающих влияние на движение АНПА. На примере показана возможность определения требований. Полученные результаты моделирования позволяют сделать заключение о применимости описанного подхода к формированию требований к системам АНПА.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00803.*

### **Литература**

1. **Боженев Ю.А.** Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктики // Гидрофизика. 2011. Том 4. №11. С. 47-68.
2. **Павин А.М.** Разработка алгоритмов поиска и обследования искусственных протяженных объектов с помощью автономного необитаемого подводного аппарата. Дис. на соиск уч.ст. канд.тех.наук. Владивосток. 2010. 160 с.
3. **Быкова В.С., Машошин А.И., Пашкевич И.В.** Алгоритм обеспечения безопасности плавания автономного необитаемого подводного аппарата // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29. № 1 (112). С. 97-110.
4. **Инзарцев А.В., Багницкий А.В.** Алгоритмы обхода локальных донных объектов для автономного подводного робота // Шестая Всерос. науч. - техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана» (ТПОМО-6). Владивосток. 2015. С. 450-454.
5. **Васьков А.С., Мироненко А.А.** Контроль движения судна по навигационным параметрам и параллельным индексам // Вестник ГУМРФ им. адм. С.О.Макарова. 2022. Т. 14, № 6. С. 826-836.
6. **Васьков А.С., Мироненко А.А.** Методы планирования ограждения опасностей для контроля в системах управления движением судна // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3-1 (61). С. 110-119.
7. **Filaretov V.F., Gubankov A.S., Gornostaev I.V.** The formation of motion laws for mechatronics objects along the paths with the desired speed // Proceedings of Int. Conf. on Computer, Control, Informatics and Its Applications, Jakarta, Indonesia. 2016. P. 93-96.
8. **Filaretov V., Gubankov A., Gornostaev I.** Method of formation of reference movement speed of working tool of multilink manipulator // Proceedings of the 5th Int. Conf. on Interactive Collaborative Robotics. St. Petersburg, Russia, 2020. P. 89-98.
9. **Ююкин И.В.** Оптимальная сплайн – траектория информативного маршрута судна в корреляционно-экстремальной навигации // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. Том 14. №2. 2022. С. 230-247.
10. **Мартынова Л.А., Киселев Н.К., Мысливый А.А.** Метод выбора архитектуры мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Информационно-управляющие системы. 2020. № 4 (107). С. 31-41.

11. **Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.И.** Алгоритмы, реализуемые интегрированной системой управления АНПА // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 1 (162). С. 50-58.
12. **Моисеев, Н.Н.** Алгоритмы развития / Н.Н. Моисеев. – М.: Наука. 1987, – 304с.
13. **Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. – М. РАН. –2018. –314 с.
14. **Мартынова Л.А., Гриненков А.В., Пронин А.О., Куликовских Ю.В.** Имитационное моделирование функционирования мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // В сборнике: Имитационное моделирование. Теория и практика. Восьмая Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. 2017. С. 474-479.
15. **Бусленко Н.П.** Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. – М.: Наука. 1978. – 400 с.
16. **Davis P.K.** Exploratory analysis enabled by multiresolution, multiperspective modeling. Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference.