

УДК 656.61.052

**OPTIMIZATION OF COLLISION AVOIDANCE MANOEUVRE
USING ANT ALGORITHM****ОПТИМИЗАЦИЯ МАНЕВРА РАСХОЖДЕНИЯ СУДОВ С
ПОМОЩЬЮ МУРАВЬИНОГО АЛГОРИТМА****O. Shyshkin, PhD, associate professor, S. Shyshkin, Chief officer, PhD student****А.В. Шишкин, к.т.н., доцент, С.А. Шишкин, ст. помощник, аспирант***National University «Odessa Maritime Academy», Ukraine**Национальный университет «Одесская морская академия», Украина***ABSTRACT**

The computation model for vessel collision avoidance route planning is designed on the base of ant colony optimization algorithm. Algorithm efficiency was demonstrated in dynamic crossing courses scenario, target is right and forward to operator vessel beam under simultaneous influence of preventing static obstacles. Algorithm allows obtaining suboptimal decision under polynomial number of computation operations. It can be used in decision support systems in shipping for vessel collision avoidance maneuvers in the real time.

Keywords: vessel collision avoidance, optimization algorithm, suboptimal decision, decision support systems.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами

Повышение интенсивности судоходства настоятельно требует разработки и внедрения систем поддержки решений судоводителя, которые обеспечили бы выполнение безопасного маневрирования судна независимо от влияния возможных ошибок в управлении судном. С другой стороны современное морское судно насыщено новыми электронными средствами навигации, такими как ЭКНИС, АИС, САРП, бортовые системы управления курсом судном (HCS) и вождения судна по маршруту (TCS) [1], которые обеспечивают судоводителя текущей навигационной информацией и автоматизируют процесс управления судном, однако не давая каких-либо решений задачи выполнения безопасного и эффективного выполнения маневра судна. Однако, несмотря на насыщение судна техническими новшествами, доля морских инцидентов, связанных с влиянием человеческого фактора, стабильно держится на уровне 70 - 80%. Субъективный подход судоводителя к планированию маневра и возможные ошибочные решения повышают риск различных аварийных ситуаций.

Навигационная система поддержки принятия решений, работающая на всех судах по единому алгоритму и использующая информацию от унифицированных датчиков информации могла бы исполнять роль общего руководящего центра при выполнении согласованного маневра расхождения.

Поэтому задача автоматизации выработки навигационных решений для предупреждения аварийных ситуаций является актуальной.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

Вопросам разработки теории и алгоритмов предупреждения столкновений в системах поддержки принятия решений для различных критериев и с учетом требований МППСС-72 посвящены многочисленные публикации, например, монографии [2, 3].

В последнее время для моделирования процессов в самых различных областях получили развитие так называемые натуральные и природные алгоритмы, объединяющие механизмы, встречающиеся в живой природе (генетические алгоритмы, эволюционное программирование, ДНК-вычисления, клеточные автоматы, муравьиные и пчелиные алгоритмы и др.). В статье [4] на примере известной «задачи коммивояжера» однократного обхода всех городов при минимизации длины маршрута продемонстрирована эффективность муравьиного алгоритма оптимизации (МАО).

В статьях [5, 6] МАО применен для расчета маршрута расхождения судов. МАО позволяет найти субоптимальное решение сложной комбинаторной задачи за время, значительно меньшее того, что требуется для полного перебора всех комбинаций. Такой подход является более практичным с точки зрения реализационных возможностей, поскольку стремление к получению математически точного решения вообще не имеет смысла в условиях недосконального определения критерия оптимизации.

Однако проблема приложения МАО к решению задач морской навигации еще далека от своего полного решения и требует, прежде всего, разработки адекватной модели движения судна, динамических целей-помех и статических препятствий.

Целью статьи является разработка модели динамики собственного судна и мешающего судна-цели при выполнении маневра расхождения с учетом требований МППСС-72, а также модели статических препятствий (береговая линия, другие навигационные ограничения). На основе компьютерного моделирования типового сценария расхождения судов должны быть даны рекомендации к выбору параметров модели и получены количественные характеристики алгоритма.

Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов

МАО основан на имитации поведения колонии муравьев в живой природе. Поведение отдельного муравья колонии диктуется стремлением поиска пищи и доставки ее в муравейник. Отдельно взятый муравей не имеет развитых средств ориентации в пространстве, но, тем не менее, колония в целом демонстрирует удивительные способности к поиску и перемещению пищи наиболее

целесообразным путем. Перемещения муравьев существенно отличается от хаотического броуновского движения, а имеют вполне рациональный и целенаправленный характер. Такая способность муравьиной колонии основана на выделении каждой особью специального вещества – феромона – и восприятия его другими особями. Чем короче будет путь каждого муравья от муравейника до местоположения пищи и обратно, тем больше переходов он совершит за световой день и тем выше будет концентрация феромона, оставленного этим муравьем, на маршруте. Другие муравьи воспринимают феромон и с большей вероятностью устремляются в направлении его большей концентрации. С течением времени вырисовывается совершенно отчетливый маршрут перемещения муравьев. При этом маршрут проложен по наиболее короткому из доступных для муравьев пути. Возникновение каких-либо препятствий, т.е. наличие нестационарностей не носит фатального деструктивного характера для функционирования колонии. При всей притягательности феромона перемещение каждого муравья носит вероятностный характер, что дает возможность исследования новых маршрутов и источников пищи и поиску кратчайшему к нему пути.

Такая манера поведения муравьиной колонии положена в основу МАО. Модель путешествия коммивояжера [4] не может быть целиком использована для наших целей, поскольку рассматриваемые процессы существенно различаются друг от друга.

Будем считать, что положение судна меняется дискретно во времени с постоянным интервалом, например, одна минута. Положение судна в t -й момент времени обозначим точкой на комплексной плоскости: $Pos(t) \in \mathbb{C}$. Состояние судна характеризуется также его курсом $Cur(t)$. На следующем шаге (через одну минуту) состояние судна определяется следующими соотношениями:

$$Pos(t+1) = Pos(t) + \Delta P(t) \cdot \exp \left[j \left(\frac{\pi}{2} - Cur(t) \right) \right],$$

$$Cur(t+1) = Cur(t) + \Delta C(t),$$

где $\Delta P(t)$ – пройденное расстояние за минуту, $\Delta C(t)$ – изменение курса за минуту.

В рассматриваемой модели полагаем, что скорость судна остается постоянной $\Delta P(t) = const$ и маневрирование осуществляется за счет изменения курса. Изменение курса в общем случае может принимать одно из возможных значений $\Delta C(t) \in [\Delta c_1, \Delta c_2, \dots, \Delta c_n]$.

Область разрешенных перемещений судна ограничивается:

- прямоугольной рамкой пространства анализа решений $[x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}]$;
- защитной зоной судна-цели, выбранной в виде круга радиуса R_{targ} с центром в точке $P_{\text{targ}}(t)$ нахождения цели;

– статическими объектами, заданными совокупностью точек $O = [O_1, O_2, \dots, O_s]$ и радиусом защитной зоны с центрами в этих точках;
 – требованиями МППСС-72, которые выражаются в ограничении области возможных значений $\Delta C(t)$.

Распределение феромона на сетке с единичной квадратной ячейкой задается матрицей $F_{m \times n}(t)$ размера $[m, n] = [(y_{\max} - y_{\min}), (x_{\max} - x_{\min})]$. В пределах одной ячейки уровень феромона в t -й момент времени остается постоянным, однако с течением времени он меняется.

При постоянной скорости судна его местоположение в $(t+1)$ момент времени определяется конкретным значением величины изменения курса $\Delta C(t)$. В соответствии с МАО выбор этого значения носит вероятностный характер из набора разрешенных значений и определяется двумя факторами: 1) расстоянием последующей точки $Pos(t+1)$ до конечной точки маршрута Fin и 2) текущим уровнем феромона в этой точке. Запишем уравнения алгоритма в адаптированном для решения навигационной задачи виде, следуя логике работы МАО для решения задачи коммивояжера [4].

Вероятность изменения курса судна на величину Δc_i на k -ой итерации и на t -ой минуте описывается следующим уравнением:

$$p_{i,k}(t) = \frac{[F_{mn}(t)]^\alpha \cdot [V_i(t+1)]^\beta}{\sum_{l \in J} [F_{mn}(t)]^\alpha \cdot [V_l(t+1)]^\beta}, \quad (1)$$

где F_{mn} – количество феромона в строке m и столбце n матрицы F ;

$$V_{i,k}(t+1) = 1 / \text{dist}[Fin - Pos_{i,k}(t+1)];$$

$\text{dist}[\]$ – функция вычисления расстояния между двумя точками комплексной плоскости;

$$m = \text{round}[\text{imag}(Pos_{i,k}(t+1))];$$

$$n = \text{round}[\text{real}(Pos_{i,k}(t+1))];$$

$\text{round}[\]$, $\text{real}(\)$, $\text{imag}(\)$ – операции округления до ближайшего целого числа, взятия действительной и мнимой частей комплексного числа соответственно;

α и β – регулируемые параметры, задающие вклад феромона и расстояния до конечной точки в формирование вероятности перехода;

J – множество разрешенных изменений курса.

Формула (1) определяет вероятности занятия новой позиции судна соответственно при изменении курса на ту или иную величину. Знаменатель в

(1) представляет собой нормирующий коэффициент такой, что на каждом шаге выполняется условие $\sum_{l \in J} p_l = 1$.

Из формулы (1) следует, что судно на каждом последующем шаге $(t+1)$ может занять одно из положений, определяемых величиной изменения курса с учетом ограничений, которые налагают динамическая цель и статические препятствия. Причем вероятность соответствующего перехода будет тем больше, чем ближе последующая позиция к конечной точке *Fin* и чем больше уровень феромона.

Вычисления по формуле (1) производят для заданного числа шагов $t = \overline{1, N}$. После $t = N$ переходов обновляют элементы (m, n) матрицы феромона F_{mn} , через которые проходил маршрут на k -ой итерации по следующему правилу.

$$F_{mn}(k+1) = (1-p) \cdot F_{mn}(k) + \Delta F(k), \quad (2)$$

где $\Delta F(k) = Q / \text{dist}[Fin - Pos_k(N)]$ – добавка феромона после k -го испытания, обратно-пропорциональная достигнутому расстоянию до конечной точки *Fin* после N шагов;

p – параметр, характеризующий испарение феромона, который практически выбирается из диапазона $[0,01 - 0,5]$;

Q – выбираемая константа одного порядка с N .

Для ускорения расчета всего маршрута из начальной точки *Start* в конечную точку *Fin* разобьем маршрут на несколько этапов так, что число шагов N на этапе заведомо меньше общего числа шагов, необходимых для преодоления всего маршрута. На первом этапе исходной точкой является точка, на каждом последующем этапе исходной точкой является точка k_0 , значение которой находится в диапазоне $1 < k_0 \leq N$. Подобным образом рассчитывается подоптимальный маршрут на этапе, первые k_0 точек которого входят в окончательный расчет всего маршрута.

Схема моделируемого маневра представлена на рис. 1. Моделировалась ситуация расхождения судов № 1 «пересечение курсов, цель справа впереди траверза судна оператора (СО)» по классификации [2]. В соответствии с правилами МППСС-72 СО, обозначенное на рис. 1 А, должно изменить свой курс вправо, уступая дорогу и выполнив маневр таким образом, чтобы не зайти в охранную зону судна-помехи В. Судно-помеха при этом должно следовать не изменяя курс и скорость. Считаем, что СО выполняет маневр на постоянной скорости, изменяя только курс. Критерием оптимизации является минимизация длины дополнительного пути с учетом возникающих статических препятствий. Полагаем, что конечная точка маневра *Fin* лежит на плановой линии пути.

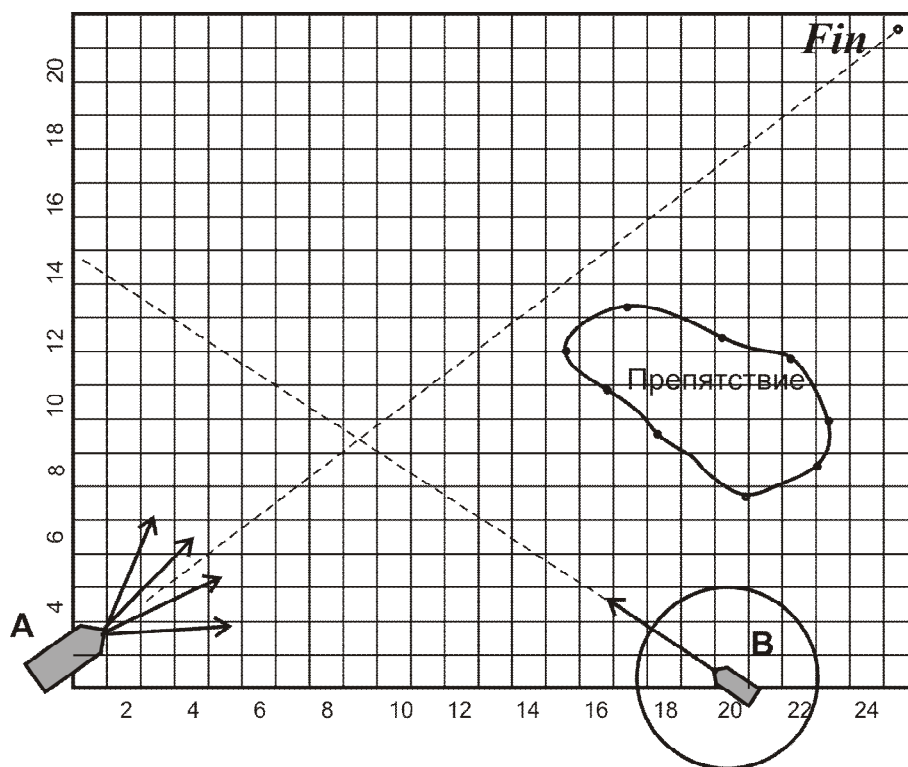


Рис. 1. Схема моделируемого маневра расхождения

Первоначально судно А находится в точке на комплексной плоскости $Start = 0,6 + 2j$ и движется курсом 54° с относительной скоростью 1 мин^{-1} . Судно Б идет курсом 150° с относительной скоростью $1,3 \text{ мин}^{-1}$ из начальной точки 20. Судно А на каждом шаге может менять свой курс на одно из значений ряда $\Delta C = [-20^\circ, -5^\circ, 5^\circ, 20^\circ]$. Значения параметров исследуемой модели сведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Значение
Судно А (судно оператор)	
Начало маршрута	$0,6 + 2j$
Конец маршрута	$25 + 20j$
Исходный курс	54°
Изменения курса	$[-20^\circ, -5^\circ, 5^\circ, 20^\circ]$
Относительная скорость	1 мин^{-1}
Судно Б (динамическая помеха)	
Исходная точка	20
Курс	150°
Относительная скорость	$1,3 \text{ мин}^{-1}$
Радиус охранной зоны	4
Ограничения	
Прямоугольная рамка	$x_{\min}=0, y_{\min}=0, x_{\max}=25, y_{\max}=20$
Навигационное препятствие (статическая помеха)	Множество 20 маркерных точек с радиусом защитной зоны, равным 1

Алгоритм	
Длина пути одного этапа, N	10
Смещение начальной точки, k_0	5
Параметр забывания, p	0,1
Количество итераций (численность муравьиной колонии)	10 - 2000

Учет требований МППСС-72 реализован посредством запрета изменения курса судна влево в течение первых трех шагов.

На рис. 2 представлены результаты формирования маршрута судна на 10-й, 15-й, 25-й и 34-й минутах. Условием завершения алгоритма является приближение к конечной точке Fin на расстояние менее 0,5.

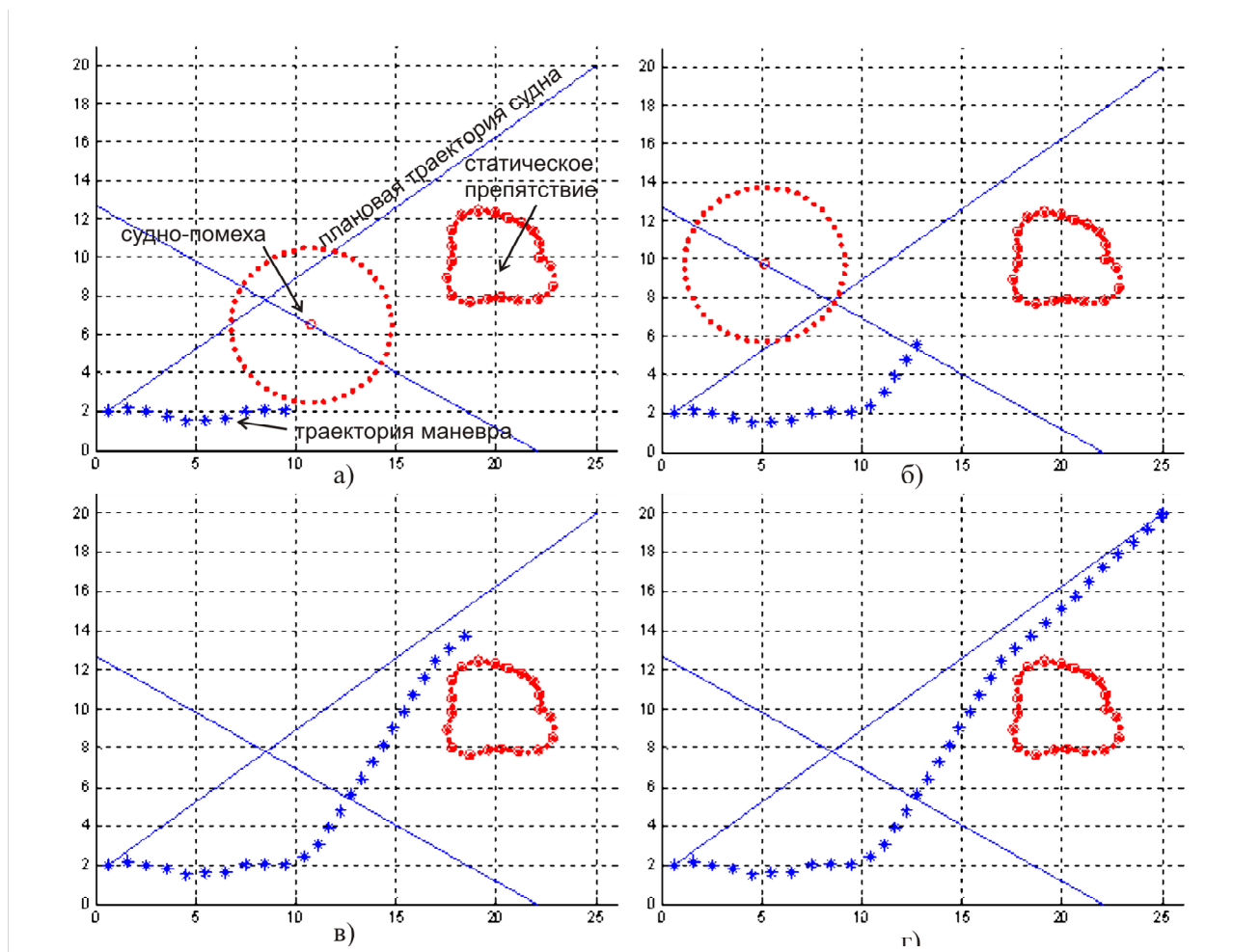


Рис. 2. Динамика формирования маршрута судна-оператора. Маршрут судна на: а) 10-й минуте, б) 15-й минуте, в) 25-й минуте, г) 34-й минуте

Точность полученного решения зависит от числа итераций алгоритма. В нашем случае критерием оптимизации является длина маршрута маневрирования СО. Исследовались зависимости длины маршрута и разброс полученных решений от количества итераций в алгоритме. На рис. 3 показаны зависимости среднего значения и среднеквадратического отклонения (СКО) рассчитанной длины маршрута в относительных единицах от количества

итераций. Усреднения проводилось по 10-ти испытаниям для каждого значения числа итераций в диапазоне от 10 до 2000 итераций.

Из графиков следует, что подоптимальное значение длины маршрута быстро падает при увеличении числа итераций и достигает значения $L \approx 33,5$ для $t_{\max} = 2000$. Очевидно, что оптимальное решение не будет существенно отличаться от полученного подоптимального значения длины маршрута.

СКО подоптимальных решений также уменьшается с ростом t_{\max} .

Оценим количество операций в алгоритме, необходимых для получения подоптимального решения. Предложенный алгоритм для получения подоптимального решения требует количества операций O , которое описывается полиномиальной зависимостью от длины маршрута L : $O = (L)^x$.

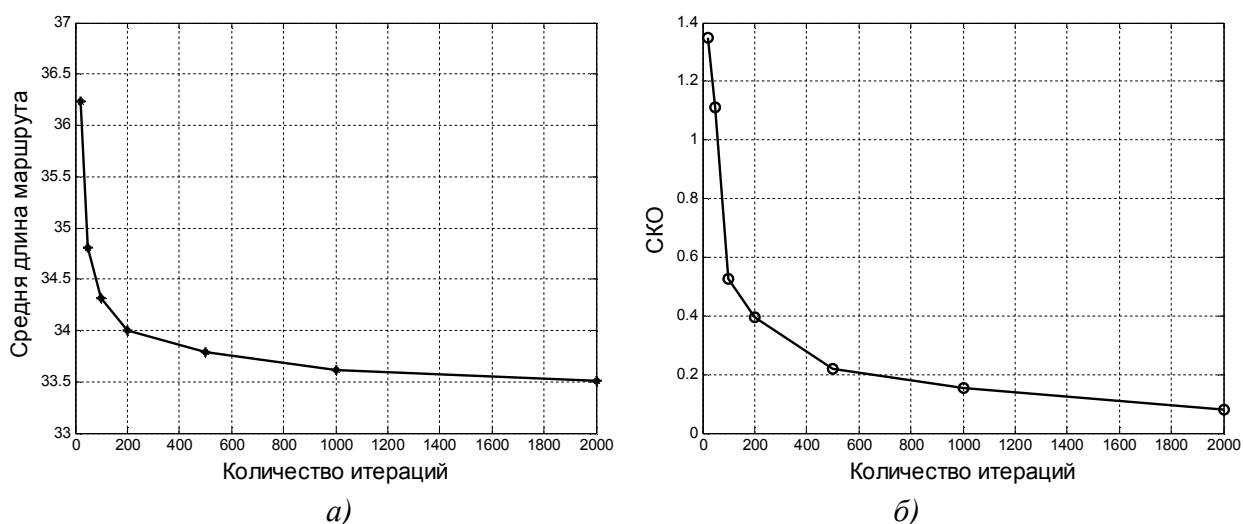


Рис. 3. Зависимости средней длины маршрута а) и СКО б) от числа итераций

Число операций в разработанном алгоритме равно $O = n_e t_{\max}$, где n_e – число этапов. Например, при $n_e = 6$ и $t_{\max} = 2000$ $O = 12000$. В этом случае показатель степени составит $x = 2,67$.

Если же применять метод простого перебора всех комбинаций, то для нахождения оптимального решения, т. е. минимальной длины маршрута для 4-х значений изменений курса потребуется $O = 4^L \approx 10^{20}$ операций. Простой перебор комбинаций требует экспоненциального времени для поиска оптимального решения и поэтому практически непригоден.

Время расчета маршрута расхождения по разработанному алгоритму для указанных параметров составило 52 сек. в среде пакета МатЛаб на компьютере Intel Pentium CPU G3220 3.00 GHz.

Выводы. Муравьиный алгоритм оптимизации является эффективным средством решения оптимизационных задач в навигации, в частности, для

планирования маневра расхождения судов. Проведенное компьютерное моделирование маневра расхождения продемонстрировало получение подоптимального решения в сложной комбинаторной задаче за полиномиальное время, значительно меньшее времени, которое требуется для точного решения комбинаторной задачи. Алгоритм показал быструю и устойчивую сходимости к оптимальному решению, что позволяет использовать его в on-line применениях навигационных систем поддержки принятия решений.

Функционирование по одинаковым алгоритмам систем поддержки принятия решений, использующие одинаковые по эксплуатационным и точностным характеристикам датчики навигационного наблюдения, позволит реализовать преимущества согласованного централизованного управления судами при маневрировании и существенно снизит влияние человеческого фактора в морской навигации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вагущенко Л.Л. Современные информационные технологии в судовождении: Электронное учебное пособие/ Одесса ОНМА, 2013. – 135 с.
2. Мальцев А.С. Методологические основы маневрирования судов при сближении [Текст]: монография / [Мальцев А. С. и др.]; Одес. нац. мор. акад. - О.: ОНМА, 2013. – 218 с.
3. Вагущенко Л.Л. Поддержка решений по расхождению с судами / Л.Л. Вагущенко, А.Л. Вагущенко – Одесса: Феникс, 2010. – 296 с.
4. Штовба С.Д. Муравьиные алгоритмы / Exponenta Pro. Математика в приложениях. № 4 (4), 2003. С. 70 – 75.
5. Tsou, Ming-Cheng and Hsueh, Chao-Kuang The study of ship collision avoidance route planning by ant colony algorithm. *Journal of Marine Science and Technology*, 2010, 18(5), pp. 746–756.
6. A. Lazarowska Ship's Trajectory Planning for Collision Avoidance at Sea Based on Ant Colony Optimisation. *The Journal of Navigation*. 2015, v. 68, pp. 291–307.