

Эволюционная динамика маршрута судна на основе современной теории катастроф

И. А. Янчин¹, О. Н. Петров²

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

¹yanchin@pm.me, ²petr_oleg@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается динамика эволюции маршрута судна, вызванной его постепенным уточнением при движении, необходимость которого обусловлена внешними факторами, которые не были известны на этапе построения, а также наличием погрешностей прогноза времени прохождения плеча маршрута. В работе даётся описание свойств маршрута, позволяющих выбрать наилучшее решение при решении задачи о поиске и интерпретации оптимального и безопасного маршрута судна. Также даётся определение коэффициентов, которые являются численным выражением этих критериев. Проводится анализ динамики изменения этих коэффициентов средствами современной теории катастроф.

Ключевые слова: маршрут судна; современная теория катастроф; эволюционная динамика

I. ВВЕДЕНИЕ

При движении судна по маршруту возможна ситуация, когда маршрут становится непроходимым. Это происходит вследствие динамических факторов, которые не были известны на момент прокладки маршрута. К таким факторам может относиться другое судно, пересекающее маршрут или погодные условия, изменившиеся после начала движения судна. Вследствие того, что маршрут стал непригодным, судно должно обновить его, выполнив процедуру построения маршрута снова, причем в этот раз точкой начала маршрута является текущее местоположение судна, а не то, которое использовалось при первоначальном поиске пути. Во время движения судна по маршруту может потребоваться обновить его несколько раз, вследствие меняющихся внешних условий. Таким образом, можно говорить о последовательном уточнении исходного маршрута в ответ на изменение внешних условий. Кроме того, помимо влияния внешних факторов, необходимость в обновлении и уточнении маршрута возникает вследствие того, что реальное прохождение маршрута не совпадает в точности с тем, которое предполагалось на момент его построения на основе моделирования движения судна; таким образом, уточнение и обновление маршрута должно осуществляться в любом случае. При построении маршрута важной является возможность учесть изменение глубин области вследствие приливно-отливных течений [5]. Используемые в этом случае прогностические модели могут иметь погрешности [4, 3], что приводит к необходимости обновления маршрута с целью компенсации неточностей

прогноза глубин. Степень изменения маршрута вследствие обновления зависит от точности моделирования движения судна и точности моделирования изменений окружающей среды, учитываемых при обновлении.

Свойства маршрута, важные для его оценки при решении задачи о поиске оптимального и безопасного маршрута судна могут быть выражены через три коэффициента: коэффициент безопасности, коэффициент расстояния и коэффициент времени. Совместно значения этих коэффициентов задают состояние процесса эволюции маршрута для некоторого момента времени. При решении задачи с использованием генетического алгоритма, эти коэффициенты могут быть использованы для расчёта приспособления маршрута, в результате чего процесс оптимизации маршрута состоит в варьировании тех характеристик маршрута, от которых зависят эти коэффициенты [2]. При уточнении маршрута, возможно такое его изменение, которое приводит к изменению его характеристик, что, в свою очередь, приводит к изменению зависящих от них коэффициентов. Как следствие, можно говорить об эволюции маршрута судна, выраженной через изменение этих коэффициентов, причём этот процесс обладает собственными динамическими характеристиками, выражающими то, как именно происходит изменение коэффициентов маршрута.

II. КОЭФФИЦИЕНТЫ МАРШРУТА

Коэффициент безопасности маршрута описывает, в какой мере судно, движущееся по маршруту, подвергается опасности. На опасность маршрута влияет ряд факторов, которые не могут быть выражены иначе как с некоторой степенью неопределённости, как следствие, для определения значения этого коэффициента может быть использован нечёткий логический вывод. Коэффициент безопасности учитывает как влияние окружающей среды, такие как глубина акватории, так и динамические характеристики, связанные непосредственно с движением судна. Этот коэффициент указывает, во-первых, может ли судно находиться в той географической области, нахождение в которой требуется для прохождения маршрута, и, во-вторых, может ли судно, без опасности возникновения чрезвычайных или экстремальных ситуаций, выполнить те манёвры, выполнения которых требует прохождение маршрута. Значение коэффициента изменяется от 0, что соответствует гарантированной аварии в процессе прохождения маршрута до 1, что

соответствует абсолютно безопасному маршруту, в процессе движения по которому судну ничего не угрожает. Таким образом, целью является максимизация значения этого коэффициента.

Коэффициент расстояния показывает, насколько маршрут судна близок к идеальному с точки зрения протяжённости. Очевидно, что кратчайшим, и, как следствие, идеальным, маршрутом является прямая, проходящая через точки начала движения и назначения. Коэффициент расстояния определён как отношение расстояния между точками начала движения и назначения маршрута по прямой и длиной маршрута. Таким образом, чем ближе маршрут к прямой, тем больше значение этого коэффициента. Коэффициент принимает значения в интервале $(0;1]$, где значение 1 достигается, когда построенный маршрут представляет собой прямую, проходящую через точки начала и назначения, то есть, когда маршрут является идеальным. Таким образом, целью является максимизация значения этого коэффициента.

Коэффициент времени показывает, насколько маршрут судна близок к идеальному с точки зрения времени прохождения. Коэффициент времени вычисляется как отношение времени движения по прямой, соединяющей точку начала движения и точку назначения с максимально возможной скоростью ко времени прохождения построенного маршрута. Очевидно, что в некоторых ситуациях значение этого коэффициента может превышать 1, когда построенный маршрут представляет собой прямую, проходящую через точки начала движения и назначения, и при этом имеет место попутное течение, такое, что результирующая скорость движения судна превышает его максимальную скорость движения. Таким образом, целью является максимизация значения этого коэффициента.

Из вышесказанного следует, что увеличение значений коэффициента расстояния и времени в результате эволюционных изменений маршрута говорит о повышении степени его оптимальности. Целью процесса эволюции маршрута является увеличение или, как минимум, сохранение степени оптимальности и безопасности, то есть увеличение или сохранение на том же уровне значений соответствующих коэффициентов. Уменьшение значений коэффициентов говорит о снижении безопасности и оптимальности маршрута, и расценивается как неблагоприятное течение процесса эволюции.

Пусть дан маршрут $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$, где r_i – i -я точка маршрута. Тогда коэффициент расстояния может быть вычислен как выражение (1), где d_l – длина отрезка, соединяющего точку начала движения и точку назначения, а l_r – длина рассматриваемого маршрута.

$$\sigma = \frac{d_l}{l_r} \quad (1)$$

В свою очередь, протяжённость всего маршрута и длина отрезка между точками начала движения и точкой назначения вычисляются как

$$l_r = \sum_{i=1}^{n-1} dist(r_i, r_{i+1}) \quad (2)$$

$$d_l = dist(r_1, r_n)$$

В выражении (2) $dist(a, b)$ – функция вычисления расстояния между точками, а r_i – i -я точка маршрута. При этом следует учесть, что вследствие кривизны Земли, $dist$, в общем случае, не может быть определена как длина отрезка на плоскости, заключенного между точками. Для получения возможности вычислить эту функцию следует либо прибегнуть к средствам сферической геометрии, либо ограничить область задачи географической областью, в рамках которой кривизной Земли можно пренебречь.

Для маршрута R , коэффициент времени может быть вычислен с помощью выражения (3), где t_l – время необходимое для преодоления расстояния между точкой начала движения и точкой назначения, при условии движения с максимальной скоростью, доступной судну, а t_r – время прохождения маршрута.

$$\lambda = \frac{t_l}{t_r} \quad (3)$$

В свою очередь, время преодоления расстояния между точками и время прохождения по маршруту могут быть вычислены с использованием выражения (4).

$$t_r = \sum_{i=1}^{n-1} (r_i^{(t)} + r_i^{(tw)}) \quad (4)$$

$$t_l = \frac{dist(r_1, r_n)}{V_s}$$

В выражении (4), $r_i^{(t)}$ – время движения по плечу маршрута, начинающемуся в точке r_i , $r_i^{(tw)}$ – время ожидания благоприятных условий для прохождения плеча r_i , а V_s – максимальная скорость движения судна.

III. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОБРАЗА МАРШРУТА

Пусть в некоторый момент времени, коэффициент безопасности маршрута имеет значение $c_{dang} = 0.77$, коэффициент времени имеет значение $c_{time} = 0.70$, а коэффициент расстояния имеет значение $c_{dist} = 0.53$. Состояние процесса эволюции маршрута для этого момента времени может быть представлена как ориентированный граф, состоящий из трёх рёбер, каждое из которых соответствует коэффициенту, причём длина ребра соответствует значению коэффициента. В этом

случае когнитивный образ этого маршрута имеет вид замкнутой кривой, как представлено на рис. 1.

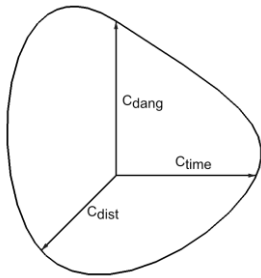


Рис. 1. Когнитивный образ маршрута

При изменении маршрута в процессе эволюции изменяются значения коэффициентов, что приводит к изменению формы этого когнитивного образа. На основе динамики изменения образа можно судить о динамике изменения маршрута, и о том, движется ли процесс эволюции в направлении целевого аттрактора (то есть оптимального и безопасного маршрута) или в направлении нарушения ограничений (получение не-безопасного и/или не-оптимального маршрута) [1]. При этом, площадь полученной таким образом фигуры может выступать как совокупная мера того, как рассматриваемый маршрут удовлетворяет требованиям к безопасности и к оптимальности.

IV. ЭВОЛЮЦИОННАЯ ДИНАМИКА МАРШРУТА

Пусть нужно построить оптимальный и безопасный маршрут для некоторого судна в некоторой акватории. В процессе эволюции маршрута значения коэффициентов изменялись как указано в табл. 1.

ТАБЛИЦА I ИЗМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ЭВОЛЮЦИИ МАРШРУТА

	C _{dang}	C _{time}	C _{dist}
1	0.75	0.68	0.64
2	0.63	0.72	0.65
3	0.74	0.73	0.52
4	0.65	0.75	0.57
5	0.71	0.74	0.54
6	0.81	0.77	0.64
7	0.79	0.72	0.64
8	0.79	0.85	0.63
9	0.76	0.84	0.72
10	0.86	0.84	0.66

На рис. 2 показан график изменения когнитивного образа в процессе эволюции маршрута. По горизонтальной оси обозначены номера измерений состояния эволюции маршрута, а по вертикальной – мера непригодности маршрута, вычисленная как разность между максимально возможным значением приспособления маршрута и фактическим значением приспособления. Другими словами, мера непригодности маршрута указывает на то, насколько сильно маршрут отличается от идеального. Таким образом, чем меньше значение непригодности маршрута, тем он лучше.

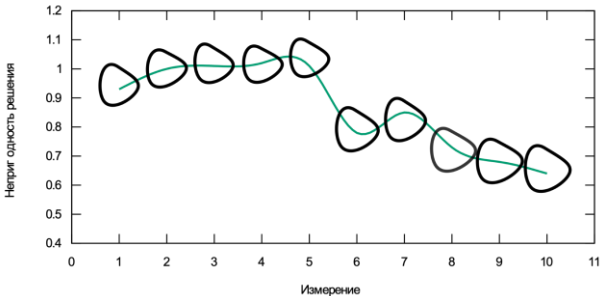


Рис. 2. Изменение когнитивного образа при движении эволюции в сторону стабилизации процесса

Как видно из рис. 2, площадь фигуры имеет тенденцию оставаться примерно постоянной на некоторых этапах эволюции, а затем увеличиваться, причем увеличение происходит скачкообразно. Это говорит о стабилизации процесса. Несмотря на то, что на некоторых этапах эволюционного процесса наблюдается ухудшение маршрута (состояния 5 и 7), последующие этапы эволюции приводят к увеличению приспособления, что отображается на графике как уменьшение величины по вертикальной оси.

В табл. 2 представлены данные об изменении коэффициентов маршрута для второго случая, в котором наблюдается нарушение стабильности процесса эволюции.

ТАБЛИЦА II ИЗМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ЭВОЛЮЦИИ МАРШРУТА

	C _{dang}	C _{time}	C _{dist}
1	0.69	0.68	0.56
2	0.68	0.65	0.45
3	0.64	0.62	0.46
4	0.67	0.66	0.43
5	0.72	0.63	0.54
6	0.66	0.68	0.50
7	0.64	0.53	0.40
8	0.65	0.58	0.38
9	0.56	0.60	0.44
10	0.52	0.53	0.39

На рис. 3 представлен график изменения когнитивного образа в процессе эволюции, описанной табл. 2. По горизонтальной оси отложены номера измерений состояния маршрута, а по вертикальной – мера непригодности маршрута.

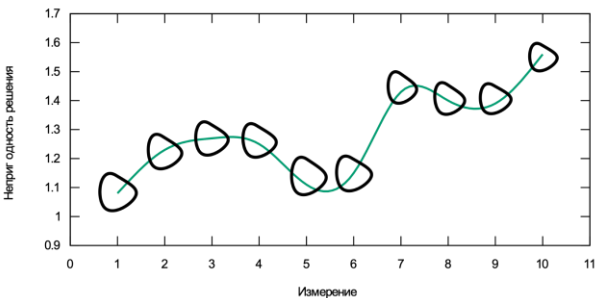


Рис. 3. Изменение когнитивного образа при движении эволюции в сторону нарушения ограничений

Как видно из рисунка, имеет место тенденция к уменьшению площади фигуры, из чего можно сделать вывод о том, что процесс эволюции движется в сторону нарушения ограничений. Об этом также говорит увеличение значения непригодности маршрута, то есть в процессе эволюции разница между идеальным маршрутом и рассматриваемым становится всё больше. Несмотря на то, что на некоторых этапах возможно улучшение маршрута (состояния 5, 6, 8 и 9), общая тенденция указывает на снижение качества маршрута, а состояния, следующие за состояниями улучшения демонстрируют ещё большее ухудшение приспособления.

Также интерес представляют состояния 1 и 2. Как видно из табл. 2, коэффициент безопасности и коэффициент времени состояния 1 превышает таковые для состояния 2, однако коэффициент расстояния для состояния 2 существенно ниже, чем для состояния 1. Различие всего в одном коэффициенте приводит к существенному изменению формы когнитивного образа (рис. 3). Это говорит о верном выборе способа представления маршрута для рассматриваемой задачи, так как важны все коэффициенты, и увеличение одних коэффициентов за счёт уменьшения остальных не должно приводить к получению решений, которые ценятся выше, чем те, которые уделяют внимание всем коэффициентам.

Коэффициенты опасности для состояний 6 и 7 примерно равны, однако коэффициенты времени и расстояния для состояния 7 существенно меньше, чем для состояния 6 (табл. 2). Как видно из рис. 3, в момент перехода от состояния 6 к состоянию 7, наблюдается скачкообразное изменение приспособленности маршрута в сторону его ухудшения, которое не только компенсирует улучшение состояния 6 по сравнению с состоянием 4, но и усугубляет нарушение

Кроме этого, как видно из рис. 2 и 3, в случае движения процесса эволюции маршрута в сторону стабилизации, величина непригодности маршрута, в среднем, ниже, чем эта же величина для случая дестабилизации процесса. Причём, если в первом случае имеется тенденция к уменьшению меры непригодности, то во втором имеется тенденция к увеличению. Это говорит о

том, что во втором случае процесс движется к катастрофе [1], то есть получению такого маршрута, который не может удовлетворить предъявленные к нему ограничения.

V. Выводы

В настоящей работе предлагается метод оценивания эволюционной динамики маршрута судна при решении задачи о построении оптимального и безопасного маршрута судна, реализованный в рамках современной теории катастроф. Предлагаемый метод основан на вычислении набора коэффициентов, каждый из которых описывает некоторую характеристику маршрута, важную для решения поставленной задачи. Как следствие, целью процесса оптимизации маршрута является максимизация значений этих коэффициентов, причём в процессе эволюции нельзя пренебречь одними коэффициентами для максимизации других. На основе совокупности значений этих коэффициентов формируется когнитивный образ рассматриваемого маршрута. Процесс эволюции маршрута рассматривается через изменение его когнитивного образа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Нечаев Ю.И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений. Санкт-Петербург. Арт-Экспресс, 2011. 392 с.
- [2] Янчин И.А. Двухкомпонентный параллельный генетический алгоритм построения оптимального и безопасного маршрута судна / И.А. Янчин, О.Н. Петров // Морские Интеллектуальные Технологии. Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2018.
- [3] Янчин И.А. Сравнительный анализ регрессионных моделей и искусственных нейронных сетей при решении задачи прогноза изменения глубин / И.А. Янчин, О.Н. Петров // Морские Интеллектуальные Технологии. Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2019.
- [4] Янчин И.А. Прогнозирование изменения глубин как периодической функции в задаче поиска пути судна. / И.А. Янчин, О.Н. Петров // Сборник докладов «XXI Международной конференции по мягким вычислениям и изменениям», 2018, изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», стр 4.
- [5] Simonsen M.H. State-of-the-Art Within Ship Weather Routing / Martin Hjørth Simonsen, Erik Larsson, Wengang Mao, Jonas W. Ringsberg // ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2015. P. 11.