

УДК 656.61.052.08 : 519.87

## Оценка позитивной полноты планирования навигационных маршрутов

И.А. Кулезнёв, М.С. Житняк, В.И. Меньшиков

*Морская академия МГТУ, кафедра судовождения*

**Аннотация.** Приведено математическое описание близости между предварительной и исполнительной прокладкой, определяющей позитивную полноту планирования, при которой реализуется траекторная неразличимость и неразличимости по показателю безопасности мореплавания.

**Abstract.** The mathematical description of the similarity between planning and executive routing defining positive completeness of planning has been given. The trajectory indistinguishable and indistinguishability in terms of maritime safety have been realized at the positive completeness of planning.

**Ключевые слова:** полнота, планирование, траектория, судно, неразличимость  
**Key words:** completeness, planning, trajectory, vessel, indistinguishability

### 1. Введение

Практика современного мореплавания показывает, что, несмотря на постоянное совершенствование технических средств морского судоходства, обеспечение безопасной эксплуатации судов продолжает оставаться острой проблемой в морской транспортной и рыболовной индустрии, а предупреждение аварийности является злободневной практической задачей. Накоплено достаточно печальных свидетельств того, что в качестве постоянной причины, порождающей аварии судов, может выступать сам судоводитель (оператор средства повышенной опасности) или субъект, управляющий движущимся объектом (Меньшиков и др., 2000). Поэтому усилия по предупреждению аварийности эксплуатируемых судов, помимо прочего, должны предусматривать поиск неиспользованных возможностей по снижению доли "человеческого фактора" или по терминологии Международной морской организации (ИМО) "человеческого элемента" в общем объёме аварийности мирового флота (Меньшиков и др., 2000). Одним из вариантов снижения аварийности, и особенно при плавании судна в стеснённых водах, является такой показатель планирования, как позитивность.

### 2. Показатель позитивной полноты маршрута перехода судна

Пусть исполнительной прокладке (реальному сценарию судовой операции) при плавании в стеснённых водах  $a \in A$  соответствует  $n$ -мерный вектор  $x$  её параметров  $x_1, \dots, x_n$ , принадлежащий ограниченной области  $X$ . Предварительная прокладка (предварительный сценарий судовой операции) этого плавания содержит вектор  $s$  варьируемых параметров  $s_1, \dots, s_n$  из параметрического множества  $B \subset A$ . Так как все неварьируемые параметры предварительной прокладки однозначно связаны с вектором  $s$ , то множество точек  $S \subset X$ , соответствующих множеству всех исполнительных прокладок  $B \subset A$ , есть некоторая линия в  $X$ . Отметим, что если  $S \subset X$  и  $F(x)$  – скалярная функция вектора  $x$ , то можно выбрать множество предварительных прокладок  $B$  таким образом, что  $\forall a \in A$  найдётся предварительная прокладка  $b \in B$ , полностью эквивалентная исполнительной прокладке в смысле функции назначения  $F$ . Действительно, множество точек  $F(x) = C$  образует некоторое  $Z_F$  многообразие в  $X$ ; варьируя константу  $C$ , можно получить семейство  $L_F$  многообразий. Множество  $S$  выберем так, чтобы оно имело непустое пересечение с каждым из этих многообразий. Тогда к любой исполнительной прокладке  $a^0$ , для которой  $F(x^0) = C_0$ , можно подобрать предварительную прокладку  $b^0$  так, что  $F(s^0) = C_0$ . Однако это не значит, что предварительная прокладка  $b^0$  будет соответствовать исполнительной прокладке с характеристикой  $\Phi(x, t)$ .

Для любой исполнительной прокладки  $a \in A$ , заданной своей временной характеристикой  $\Phi(x, t)$ , надо найти такую процедуру определения предварительной прокладки  $b(a)$  с варьируемым векторным параметром  $s$ , чтобы погрешность, определяющая близость прокладок вида

$$A = \int_x [F(x) - F(s)]^2 dx, \quad (1)$$

была минимальной. Такую процедуру будем называть оптимальной аппроксимацией исполнительной прокладки при плавании судна в условиях стеснённого судоходства. В процедуру определения модели предварительной прокладки входит выбор множества  $S$ , соответствующего множеству всех предварительных прокладок  $B$  и подынтегральной функции в (1).

Для исследования величины (1), характеризующей полноту планирования предварительной прокладки, рассмотрим  $L_F$  и  $L_\Phi$  многообразия. Поверхность уровня функции  $F$ , описываемую уравнением  $F(x) - C = 0$ , назовем  $L_F$  многообразием, а множество точек  $x \in L_\Phi$ , проектирующихся в одну и ту же точку  $s$  при минимизации (1),  $L_\Phi$  многообразием. Погрешность аппроксимации (1) равна нулю только в том случае, когда  $L_F$  и  $L_\Phi$  многообразия совпадают во всех точках области  $X$ . Покажем, что если  $\Phi(x, t)$  и  $F(x)$  линейны по  $x$ , то можно выбрать множество  $S$  так, что  $L_F$  и  $L_\Phi$  всюду совпадут. Минимизация величины (1) по  $s$  означает, что

$$\partial \left\{ \int_T [\Phi(x, t) - \Phi(s, t)]^2 dt \right\} / \partial s = 0$$

или

$$\int_T [\Phi(x, t) - \Phi(s, t)] (\Phi(s, t) / \partial s) dt. \quad (2)$$

Уравнение (2) описывает множество точек  $x$ , проектирующихся в точку  $s$  при минимизации интеграла (1), т.е. является уравнением  $L_\Phi$  многообразия. Для погрешности (1), равной нулю, уравнения  $L_\Phi$  и  $L_F$  многообразий должны совпадать. Для этого должно выполняться тождество

$$\int_T [\Phi(x, t) - \Phi(s, t)] (\Phi(s, t) / \partial s) dt \equiv F(x) - C = 0. \quad (3)$$

### 3. Условия позитивной полноты плановой траектории судна

В полученном тождестве далее будем считать, что множество  $S$  вырождается в прямую линию, которая в параметрическом виде выглядит следующим образом:

$$x_i = l_i s, \quad (4)$$

где  $l_i$  – направляющие косинусы для этой прямой.

При допущении о том, что множество  $S$  является прямой линией, направляющие косинусы в (4) можно найти из системы линейных алгебраических уравнений

$$\sum_{j=1}^n k_{ij} l_j = c_i, \quad (5)$$

где  $k_{ij} = \int_T \Phi_i(t) \Phi_j(t) dt$ , при  $i = 1, n$ .

Тогда

$$\Phi(s, t) = s \sum_{i=1}^n \Phi_i(t) l_i \quad \text{и} \quad \Phi(s, t) / \partial s = \sum_{i=1}^n \Phi_i(t) l_i.$$

Дополнительно будем считать, что

$$\Phi(x, t) = \sum_{i=1}^n \Phi_i(t) x_i; \quad F(x) = \sum_{i=1}^n c_i x_i. \quad (6)$$

Перепишем тождество (3) с учётом (4) и (6) следующим образом:

$$\int_T \left[ \sum_{i=1}^n \Phi_i(t) x_i - s \sum_{i=1}^n \Phi_i(t) l_i \right] \sum_{j=1}^n \Phi_i(t) l_i (\sum_{i=1}^n \Phi_j(t) l_j) \equiv \sum c_i x_i - C.$$

Приравнивая коэффициенты при соответствующих значениях  $x_i$  для ( $i = 1, n$ ), получим

$$\sum_{j=1}^n k_{ij} l_j = c_i \quad (i = 1, n),$$

что соответствует (5).

Осталось показать, что не зависящие от  $x_i$  константы в левой и правой части тождества (3) равны друг другу, т.е.

$$s \int_T \left[ \sum_{j=1}^n \Phi_j(t) l_j \right]^2 dt = C$$

или

$$s \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} l_j = C. \quad (7)$$

Из правой части тождества (3) с учетом (6), (4) и (5) следует

$$C = F(x) = s \sum_{i=1}^n c_i l_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} l_j. \quad (8)$$

Тогда величины (7) и (8) равны друг другу и, следовательно, погрешность (1) будет характеризовать позитивную полноту плановой траектории судна.

Необходимо отметить, что для нелинейных функций  $\Phi$ ,  $F$  погрешность аппроксимации не равна нулю, и её минимизацию следует осуществить следующим образом. Во-первых, определяется область  $X$ , к которой принадлежит исполнительная прокладка, а во-вторых, выбирается функция назначения  $F$ . Среди возможных физико-морфологических факторов, учитываемых при планировании предварительной прокладки в стеснённых водах, предпочтительней те, для которых реакция исполнительной прокладки  $\Phi$  наиболее соответствует условиям:

$$\Phi(x, t) = \sum_{i=1}^n \Phi_i(t) \psi(x_i); \quad F(x) = \sum_{i=1}^n c_i \psi(x_i).$$

При этом расчёты следует производить для всех физико-морфологических факторов и выбрать из них наиболее опасные с максимальными величинами рисков.

#### 4. Заключение

Проработка маршрута перехода судна и представление этого плана в виде последовательности управлений, выбранных с учётом навигационных опасностей, определённых с помощью алгоритма ФОб, позволяет минимизировать количество разрешений проблемных навигационных ситуаций при реализации этого маршрута. Однако следует отметить, что минимизация количества разрешений плановых проблемных навигационных ситуаций не способна гарантировать, что в процессе реализации проекта перехода не возникнут дополнительные навигационные опасности и не сформируются дополнительные проблемные ситуации.

#### Литература

**Меньшиков В.И., Глущенко В.М., Анисимов А.Н.** Элементы теории управления безопасностью судоходства. Мурманск, МГТУ, 242 с., 2000.