

## Достоверность контроля состояния безопасности навигации при избыточном числе параметров

**М.М. Еремин, В.И. Меншиков**

*Судоводительский факультет МА МГТУ, кафедра судовождения*

**Аннотация.** Оцениваются возможности по ведению достоверного контроля состояния безопасности навигации при избыточном числе контролируемых параметров. Даются практические рекомендации по выбору оптимального периода выполнения контрольных мероприятий.

**Abstract.** In the paper the authors have estimated the possibilities of reliable secure state control of navigation at an irredandant number of some operated parameters. The practical recommendations concerning the choice of the optimal period of control actions have been given as well.

### 1. Введение

Ныне действующие рекомендации, определяющие процедуру выбора периода коррекции счисления, основываются на том, что судоводитель использует для восстановления траектории судна исключительно дискретные методы определения места судна (Лушников, 2000). Однако такие рекомендации обладают существенными недостатками. С одной стороны, не используется полностью информация о текущем состоянии безопасности навигации, а, с другой в этих рекомендациях используются слишком "жесткие" ограничения, соответствующие модели роста неопределенности в текущем месте судна. Однако внедрение в судовождение спутниковых навигационных систем (СНС), а также использование на судах спутниковой навигационной аппаратуры (СНА) способны изменить существующую практику оценки состояния безопасности навигации. Новые технические средства судовождения позволяют разрабатывать принципиально новые методики контроля состояния безопасности навигации, которые основаны на методе непрерывного обсервационного счисления и более полном использовании информации, поступающей судоводителю от систем отображения, как СНА, так и электронной картографии. Полученные результаты легко могут быть применены на практике, поскольку они не противоречат рекомендациям Международной Морской Организации (ИМО) и обновленной концепции Стандарта точности навигации (Лушников, 2000), а лишь дополняют и развивают их.

### 2. Исходные предположения

Рассмотрим избыточную систему, состоящую из  $N$  навигационных сообщений, которая передается космическим сегментом СНС и, после преобразования программным обеспечением и системой отображения СНА, становится доступной судоводителю в форме, удобной для его восприятия. Прием судоводителем любого  $i$ -го сообщения ( $i \in N$ ), включающего в себя только часть сведений о параметрах состояния навигационной безопасности, является периодическим процессом, который можно характеризовать в общем случае периодом  $\omega_i$  и временем (фазой)  $\varphi_i$  обращения судоводителя к форматам системы отображения СНА. Во время просмотра конкретного формата судоводитель получает полную информацию о параметрах состояния безопасности навигации, но лишь ту, которая отображается в этом формате и соответствует принятому сообщению. Дополнительно можно принять, что при просмотре конкретного формата информация о параметрах состояния безопасности навигации, содержащаяся в других сообщениях СНС, судоводителю неизвестна, т.е. система отображения СНА построена таким образом, что доступ более чем к одному формату невозможен.

Пусть общее время, затрачиваемое судоводителем на доступ и просмотр одного формата, равно  $t_i$ , а функции распределений интервалов времени, в течение которых параметры состояния безопасности навигации, являясь квазистационарными и обеспечивая заданный минимальный уровень рисков, подчиняются показательному закону с известными или частично известными коэффициентами  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ . Кроме того, отображение параметров в форматах системы отображения СНА достаточно "хорошо" воспринимается судоводителем, а его обращение к форматам достаточно "быстрое", причем такое, что за время просмотра достоверность информации о состоянии безопасности навигации во всей системе из  $N$  сообщений не изменяется.

В практическом судовождении при организации достоверных контрольных измерений состояния безопасности навигации могут возникнуть два предельных случая. Первым из них является тот, когда организация контроля осуществляется в условиях дефицита информации относительно вариаций параметров состояния СНС и тенденций роста неопределенности в текущем месте судна. Вторым

предельным случаем является наличие у судоводителя достаточно надежной априорной информации об изменчивости контролируемых параметров состояния безопасности навигации.

### 3. Постановка и решение задачи в условиях неполной информации

Достоверность правильного обеспечения принятого уровня навигационной безопасности судна зависит от периодов и фаз просмотров судоводителем форматов системы отображения СНА. Поэтому можно поставить задачу определения таких периодов и фаз просмотра судоводителем системы из  $N$  сообщений, которые обеспечили бы достоверность поддержания принятого уровня навигационной безопасности не ниже заданного  $I_0$ , при минимальных временных затратах на контрольные операции с форматами системы отображения СНА. Однако после решения этой задачи и практической реализации программы контроля могут возникнуть достаточно жесткие двухсторонние требования к точности реализации фаз просмотров форматов из-за опасения снизить достоверность поддержания принятого уровня безопасности навигации. Поэтому скорректируем выше поставленную задачу и сформулируем ее так. Необходимо найти такие периоды (частоты) просмотров форматов систем отображения СНА и электронной картографии  $\omega_i$ , чтобы при любых фазах  $\varphi_i$  ( $i \in N$ ,  $0 \leq \varphi_i \leq \omega_i$ ) достоверность поддержания принятого уровня безопасности навигации была не ниже  $I_0$  при минимальных временных затратах на контрольные операции с форматами систем отображения. При этом невозможность одновременного просмотра двух и более форматов в системе отображения порождает, вообще говоря, дополнительное ограничение на допустимое решение. Однако с практической точки зрения, когда период просмотра каждого сообщения значительно превосходит само время такого просмотра, дополнительное ограничение является несущественным. Во всяком случае, в рамках сделанных предположений разнесение просмотров сообщений во времени возможно за счет пренебрежимо малых девиаций частот контрольных обращений судоводителя к форматам системы отображения СНА.

Выполним формализацию и решим сформулированную выше задачу. Для этой цели положим, что достоверность поддержания состояния безопасности навигации в целом зависит от достоверности  $I_i(t)$ , с которой отслеживается изменение отдельных параметров, содержащихся в каждом сообщении. Тогда для избыточной системы сообщений достоверность контроля параметров состояния безопасности навигации в целом можно определить следующим выражением:

$$I(t) = \prod_{i=1}^N I_i(t). \quad (1)$$

Каждый параметр состояния безопасности навигации предполагаем отвечающим квазистационарному характеру изменения, описываемому экспоненциальным законом распределения. Пренебрегая незначительными величинами  $t_i$  и обеспечивая тем самым некоторый запас достоверности, можно считать, что минимальное значение достоверности на отрезке времени  $[0, t]$  равно

$$\min_t I_i(t) = \exp(-\lambda_i \omega_i). \quad (2)$$

Потребуем, чтобы

$$\prod_{i=1}^N \min_t I_i(t) \geq I_0. \quad (3)$$

Очевидно, что реализация этого условия способна придать достоверность контролю состояния безопасности навигации при любых соотношениях фаз для процесса периодических обращений судоводителя к форматам системы отображения СНА, так как

$$I(t) = \prod_{i=1}^N I_i(t) \geq \prod_{i=1}^N \min_t I_i(t).$$

Из соотношений (2) и (3) найдем условие

$$\prod_{i=1}^N \exp(-\lambda_i \omega_i) \geq I_0,$$

откуда следует

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i \omega_i \leq \ln(1/I_0). \quad (4)$$

При указанных предположениях об организации просмотра судоводителем форматов, содержащих сообщения о параметрах состояния безопасности навигации, относительные временные затраты на общий контроль этого состояния можно определить так

$$W = \sum_{i=1}^N t_i / \omega_i. \quad (5)$$

Следовательно, сформулирована экстремальная задача, в которой следует найти такие периоды просмотра сообщений от системы отображения СНА  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N$ , чтобы они удовлетворяли выражению (4) и доставляли минимум целевой функции (5).

Для сформулированной задачи, можно найти аналитическое решение, например, привлекая метод полной математической индукции по  $N$ , получим это решение в следующем виде

$$\omega_i = [(t_i / \lambda_i)^{1/2} \ln(1/I_0)] / \sum_{i=1}^N t_i \lambda_i. \quad (6)$$

Решение (6) реально обеспечивает минимум целевой функции (5). Численно такой минимум равен

$$W_{\min} = [\sum_{i=1}^N (t_i \lambda_i)^{1/2}]^2 / \ln(1/I_0). \quad (7)$$

Рассмотренная методика поддержания заданной достоверности при контроле состояния безопасности навигации, реализуемая путем просмотра судоводителем форматов системы отображения СНА с периодами (6), приводит к необходимости разработки циклически повторяющихся процедур, аналогичных рекомендациям (Лушников, 2000). Однако, учитывая общее количество параметров состояния безопасности навигации, подлежащих контролю в системе отображения СНА и отсутствие каких-либо ограничений на периоды следования сообщений, общая процедура контроля может быть достаточно сложной и, самое главное, трудно реализуемой с практической точки зрения, особенно при наличии дефицита времени у судоводителя. Для того, чтобы приблизить общую контрольную процедуру к уровню практической реализуемости достаточно использовать величину глобального периода просмотра форматов  $\Omega$ .

Учитывая отсутствие каких-либо данных относительно вариации периодов следования сообщений  $\omega_i$ , выбрать конкретную величину глобального периода контрольной процедуры  $\Omega$  можно, если, например, привлечь для этой цели оценку

$$\langle \Omega \rangle = M[\omega_i] = 1/N \sum_{i=1}^N \{[(t_i / \lambda_i)^{1/2} \ln(1/I_0)] / \sum_{i=1}^N t_i \lambda_i\}. \quad (8)$$

Естественно, что глобальный период просмотра форматов судоводителем (8) уже нельзя отнести к числу оптимальных по критерию (5). Однако в процессе эксплуатации СНА можно проводить периодическую коррекцию рассчитанных по формуле (6) периодов просмотра форматов, и тем самым, приближать результат (8) к оптимуму (7).

Здесь необходимо отметить, что рекомендуемая корректура периодов  $\omega_i$  не будет уменьшать достоверность наблюдаемого состояния безопасности навигации лишь в том случае, когда величины  $\omega_i$  уменьшаются, а не увеличиваются. Скорректированные значения периодов просмотра форматов  $\omega_i^0$  могут быть определены из выражения

$$\omega_i^0 = -\Omega / E(-\Omega / \omega_i), \quad (9)$$

где  $E(-x)$  – означает операцию по округлению до большей целой величины.

#### 4. Решение задачи при наличии дополнительной априорной информации

Приведенный вариант решения задачи (4-5) не позволяет уверенно утверждать, что выбранные и скорректированные периоды обращения судоводителя к форматам системы отображения СНА будут отвечать минимуму временных потерь. Поэтому можно предложить другой подход к решению задачи контроля (4) и (5), предварительно задав условия, которые ограничивают длительность периодов следования сообщений. Такие условия должны существенно упростить идентификацию периода глобального контроля параметров и, самое главное, гарантированно обеспечивать незначительное отступление величины периодов просмотра форматов от оптимума.

Примером одного из таких дополнительных условий может быть ограничение на длительность глобального периода  $\Omega$  сверху. Ограничение достаточно разумное с физической точки зрения, поскольку хорошо увязывается с особенностями приема информации от рабочего созвездия искусственных спутников земли космического сегмента СНС и работой СНА. Кроме того, ограничение может быть связано с частотой наблюдений, заложенной в современный стандарт точности или его обновленную концепцию (Лушников, 2000).

Потребуем, чтобы глобальный период был не больше максимального из периодов полученного решения, т.е.

$$\Omega \leq \max_i \omega_i$$

причем так, чтобы  $\omega_i^0 \leq \omega_i$ , и отношение  $\Omega/\omega_i^0$  было целым числом для всех  $i$ , а так же введем форму

$$W^0 = \sum_{i=1}^N t_i/\omega_i^0, \quad (10)$$

которая должна подлежать минимизации.

Тогда оптимальным глобальным периодом просмотра судоводителем форматов системы отображения СНА, позволяющим достоверно контролировать параметры состояния безопасности навигации, можно считать такой

$$\Omega \leq \max_i \omega_i, \quad (11)$$

который доставляет минимум функции вида

$$W^0(\Omega) = -1/\Omega \sum_{i=1}^N t_i E(-\Omega/\omega_i). \quad (12)$$

Сформулируем требования к функции (12), при которых она способна обеспечить расчет  $\Omega_{\text{опт}}$  – оптимального глобального периода просмотра судоводителем форматов системы отображения СНА, минимизирующего временные затраты.

Рассмотрим условие (11) и, увеличивая значения  $\Omega$  на величину, равную

$$\Delta\Omega < \min_j [-\omega_j E(-\Omega/\omega_j) - \Omega], \quad (13)$$

получим:

$$\Omega + \Delta\Omega < \max_i \omega_i. \quad (14)$$

В самом деле, выражение, стоящее под знаком "min", имеет при  $\omega_j = \max_i \omega_i$  значение, не меньшее, чем  $\Delta\Omega$ , т.е.

$$\Delta\Omega < \min_j [-\omega_j E(-\Omega/\omega_j) - \Omega] \leq -\max_i \omega_i E(-\Omega/\max_i \omega_i) - \Omega.$$

Тогда в силу (11) можно найти  $-E(-\Omega/\max_i \omega_i) = 1$ , откуда непосредственно и вытекает условие (14).

Пусть далее  $E(-\Omega/\omega_i) = -k_i$ , тогда  $-k_i \leq -\Omega/\omega_i < -k_i + 1$ , причем

$$k_i \omega_i - \omega_i < 0. \quad (15)$$

Если далее учитывать выражение (13), то имеем  $\Delta\Omega < k_i \omega_i - \Omega$  для всех  $i$ . Отсюда, принимая во внимание (15) и  $\Delta\Omega > 0$ , получим

$$-k_i < (\Omega + \Delta\Omega)/\omega_i < -k_i + 1$$

или окончательно найдем

$$E[-(\Omega + \Delta\Omega)/\omega_i] = -k_i.$$

Итак, придав величине  $\Omega$  приращение  $\Delta\Omega$ , нетрудно заметить, что числитель целевой функции остается неизменным, а знаменатель  $\Omega$  увеличивается за счет приращения, что ведет к уменьшению значения (12).

Следовательно, чтобы периодичность просмотра судоводителем форматов системы отображения СНА была оптимальной по критерию (12) и одновременно обеспечивала принятую в контрольной процедуре достоверность, необходимо при выборе глобального периода  $\Omega$  руководствоваться правилом

$$\Omega = k\omega_i, \quad (16)$$

где  $k$  – целое число.

Однако правило выбора глобального периода контрольной процедуры за состоянием безопасности навигации не дает представления об области допустимых значений величины  $\Omega$ . Поэтому в дополнение к (16) следует найти верхнюю и нижнюю грани этой области. Верхняя грань области определяется автоматически, поскольку глобальный период контрольной процедуры должен удовлетворять неравенству (11). Поиск величины нижней грани начнем с того, что примем

$$\max_i \omega_i < 2\Omega. \quad (17)$$

Для любого действительного числа  $x$  всегда имеют место соотношения вида

$$E(-2x) \geq 2E(-x), \quad -E(-2x) \leq -2E(-x),$$

которые, в свою очередь, позволяют записать два неравенства

$$\begin{aligned} -0.5 E(-2\Omega/\omega_i) &\leq -E(-\Omega/\omega_i), \\ -0.5 E(-2\Omega/\max\omega_i) &< -E(-\Omega/\max\omega_i), \end{aligned}$$

для всех значений  $i$ .

Если учитывать два последних неравенства, то можно найти соотношение порядков для целевой функции (12) и при условии оптимальности  $\Omega$

$$W(\Omega) = - \sum_{i=1}^N t_i E(-\Omega/\omega_i) / \Omega \leq \sum_{i=1}^N t_i E(-2\Omega/\omega_i) / 2\Omega.$$

Соотношение порядков целевой функции (12) подтверждает правильность введенного допущения (17) и позволяет конкретизировать область существования оптимального периода контрольной процедуры, записав ее так

$$0.5 \max_i \omega_i < \Omega \leq \max_i \omega_i. \quad (18)$$

Таким образом, оптимальный глобальный период контроля  $\Omega$  состояния безопасности навигации, обеспечивающий заданную достоверность, определяется путем решения экстремальной задачи (11), (12) с учетом кратности периода (16) и ограничений на область его определения (18). В общем случае расчет оптимального глобального периода обращения судоводителя к форматам системы может быть реализован с помощью перебора конечного числа точек числовой оси. Методика решения включает в себя следующие операции:

- по эмпирическим наблюдениям рассчитывается максимальный период контрольных действий судоводителя среди всех периодов обращения к форматам системы отображения СНА, т.е. по формуле (6) определяются  $\omega_i$ , а из них выбирается  $\Omega_0 = \max \omega_i, i = 1, \dots, N$ ;
- вычисляются значения  $W^0(\Omega)$  в точках  $\Omega = k\omega_v$ , причем таких, что

$$0.5 \Omega_0 < k\omega_v \leq \Omega_0, \text{ где } v = 1, 2, \dots, N.$$

- отыскивается величина  $\min W^0$  среди всех  $N$  вычисленных значений  $W^0(\Omega)$  и, соответственно, принимается в качестве оптимального глобального периода  $\Omega_{\text{опт}}$ ;
- производится нормирование периодов просмотра форматов СНА при известном оптимальном глобальном периоде  $\Omega_{\text{опт}}$  по формуле (9).

Здесь следует заметить, что при определении по формуле (8) оценки величины глобального периода контрольных действий с форматами системы отображения СНА условия (16) и (18) так же являются обязательными.

## 5. Заключение

Развитие технических средств судовождения и их внедрение в практическую деятельность судоводителей вносят существенные коррективы в ныне рекомендуемые технологические операции по контролю безопасности навигации. Например, комплексирование судовой навигационной аппаратуры и системы электронной картографии переводит такие операции, как периодическое определение текущего места судна и нанесение его на бумажную морскую карту, в разряд резервных. В то же время, учитывая сложность СНС, в состав основных технологических операций должны быть дополнительно включены действия, направленные на осуществление периодического контроля работоспособности системы и реализуемые с помощью информационно-управляющих форматов СНА. Поэтому практические результаты выполненного исследования позволяют судоводителю сознательно осуществить выбор оптимального периода обращения к информационно-управляющим форматам СНА, обеспечивающего заданный уровень достоверности контроля и минимизирующего временные затраты.

## Литература

Лушников В.П. Теоретическое обоснование методов и средств обеспечения навигационной безопасности мореплавания. Автореф. дис. д-ра техн. наук, С-Пб., 46 с., 2000.