

## КОНТРОЛЬ ТОЧНОСТИ ПЛАВАНИЯ СУДНА ПО ЗАДАННОМУ МАРШРУТУ

Интенсивное судоходство и навигационные опасности значительно осложняют плавание судов в стесненных водах и создают предпосылки для возникновения аварийных ситуаций.

Обеспечение безопасного судовождения в стесненных водах требует навигационного оборудования, гарантирующего требуемую точность проводки судов заданными маршрутами. Указанные вопросы рассмотрены в работах [1 - 6]. Так, в работе [1] изложены принципы навигационного оборудования, как операции по обеспечению необходимого уровня точности плавания судов, а вопросы разработки локальных систем навигационного оборудования стесненных районов освещены в работах [2, 3]. Оборудованию стесненных вод локальной системой, использующей корреляционные принципы навигации, посвящена работа [4]. Разработка многопозиционных радиолокационных систем обращенного типа и оценка их точности с помощью скалярного критерия точности рассмотрена в работах [5, 6].

Целью данной публикации является выбор критерия для оценки точности контроля места судна на заданном маршруте с учетом возможностей имеющегося в районе плавания навигационного оборудования.

Навигационное оборудование стесненных районов плавания осуществляется системами, позволяющими получить совокупность линий положения и осуществить контроль местоположения судна. По принципу действия системы навигационного оборудования подразделяются на системы прямого и обращенного типа. К системам прямого типа относится множество естественных и искусственных навигационных ориентиров, с помощью которых можно измерить навигационные параметры с судна и судовыми средствами определить его обсервованное место. К системам прямого типа относятся также и локальные системы, например, корреляционные радиолокационные системы [6]. Радионавигационные локальные системы обращенного типа определяют высокоточные координаты судна, находящегося в области действия системы, и передают их на судно. В частности, многопозиционная радиолокационная система обращенного типа обеспечивает точность контроля места судна, которая сопоставима с точностью спутниковых навигационных систем [7].

Для сравнения эффективности разных типов систем навигационного оборудования следует выбрать критерий точности плавания судна по заданному маршруту, отражающий целевое назначение таких систем. В качестве такого критерия можно выбрать значение минимальной точности, которое достигается на рассматриваемом участке программной траектории.

Очевидно, универсальным критерием оценки точности положения судна, который не зависит от типа системы навигационного оборудования, является дисперсия модуля векториальной погрешности обсервованного места судна. В данном случае векториальная погрешность характеризуется скалярным показателем точности, который обозначен  $D_r$ .

Полной вероятностной характеристикой векториальной погрешности является ковариационная матрица  $K(\Delta X, \Delta Y)_{\min}$ , заданная в системе координат  $O\Delta X\Delta Y$ , начало которой совпадает с обсервованной точкой. Как показано в работе [5]

$$K(\Delta X, \Delta Y)_{\min} = \frac{1}{\Delta_r} \left\| \begin{array}{cc} \sum_{i=1}^n s_i^{-1} \sin^2 \alpha_i & - \sum_{i=1}^n s_i^{-1} \sin \alpha_i \cos \alpha_i \\ - \sum_{i=1}^n s_i^{-1} \sin \alpha_i \cos \alpha_i & \sum_{i=1}^n s_i^{-1} \cos^2 \alpha_i \end{array} \right\|,$$

где  $n$  – число линий положения;  $\alpha_i$  – направление градиента  $i$ -й линии положения;

$$\Delta_r = \left[ \left( \sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i \right) \left( \sum_{i=1}^n \sin^2 \alpha_i \right) - \left( \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \cos \alpha_i \right)^2 \right];$$

$$s_i = \int_{R1} \frac{\left[ \frac{\partial}{\partial \xi_i} f(\xi_i) \right]^2}{f(\xi_i)} d\xi_i.$$

В последнем выражении  $f(\xi_i)$  – плотность распределения погрешности  $\xi_i$   $i$ -й линии положения.

С другой стороны, ковариационная матрица векториальной позиционной погрешности

$$K(\Delta X, \Delta Y)_{\min} = \left\| \begin{array}{cc} D_x & D_{xy} \\ D_{xy} & D_y \end{array} \right\|,$$

где  $D_x$  – дисперсия составляющей векториальной погрешности по оси  $\Delta X$ ,

$$D_x = \frac{1}{\Delta_r} \sum_{i=1}^n s_i^{-1} \sin^2 \alpha_i;$$

$D_y$  - дисперсия составляющей векториальной погрешности по оси  $\Delta Y$ ,

$$D_y = \frac{1}{\Delta_r} \sum_{i=1}^n s_i^{-1} \cos^2 \alpha_i;$$

$D_{xy}$  - второй смешанный момент,

$$D_{xy} = \frac{1}{\Delta_r} \sum_{i=1}^n s_i^{-1} \sin \alpha_i \cos \alpha_i .$$

Независимо от значения второго смешанного момента  $D_{xy}$ , дисперсия модуля векториальной погрешности обсервованного места судна  $D_r$  является суммой дисперсий его составляющих  $D_x$  и  $D_y$ , т.е.

$$D_r = D_x + D_y .$$

Подставляя в последнюю формулу выражения для дисперсий  $D_x$  и  $D_y$ , получим:

$$D_r = \frac{1}{\Delta_r} \left( \sum_{i=1}^n s_i^{-1} \sin^2 \alpha_i + \sum_{i=1}^n s_i^{-1} \cos^2 \alpha_i \right) .$$

В работе [5] показано, что при нормальном законе распределения вероятностей погрешностей навигационных параметров  $\xi$  плотность распределения

$$f(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left\{-\frac{\xi^2}{2\sigma_i^2}\right\},$$

и интеграл  $s_i$  в общем случае принимает вид  $s_i = 1/\sigma_i^2$ . Если линия положения получена измерением дистанции, то  $s_{Di} = 1/\sigma_{Di}^2$ , а если с помощью измерения пеленга, то  $s_{Pi} = 1/\sigma_{Pi}^2$ . Здесь  $\sigma_{Di}^2$  и  $\sigma_{Pi}^2$  - дисперсии погрешности измерения дистанции и позиционной погрешности, которая возникает от погрешности измерения пеленга, причем  $s_{Pi} = (m_{Pi} D_i)^{-2}$ , где  $m_{Pi}$  - среднее квадратическое отклонение по-

грешности измерения пеленга, а  $D_i$  - дистанция между ориентиром и наблюдателем.

Поэтому в общем случае при неравноточных измерениях показатель точности

$$D_r = \frac{1}{\Delta_r} \left[ \sum_{i=1}^n s_i^{-1} (\sin^2 \alpha_i + \cos^2 \alpha_i) \right] = \frac{1}{\Delta_r} \sum_{i=1}^n s_i^{-1},$$

а в случае нормального распределения погрешностей навигационных измерений

$$D_r = \frac{1}{\Delta_r} \sum_{i=1}^n \sigma_i^2.$$

При перемещении судна по заданному маршруту для контроля места судна может быть использовано не более трех ориентиров. При наличии одного ориентира обсервованное место судна может быть получено по пеленгу и дистанции ориентира, а при наличии двух и трех ориентиров для контроля места судна может быть использовано не более трех линий положения. При использовании двух линий положения

$$\Delta_r = (\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_2)(\sin^2 \alpha_1 + \sin^2 \alpha_2) - (\sin \alpha_1 \cos \alpha_1 + \sin \alpha_2 \cos \alpha_2)^2,$$

или после преобразований:

$$\begin{aligned} & (\sin^2 \alpha_2 \cos^2 \alpha_1 + \sin^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2 - 2 \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2) = \\ & = \sin^2 (\alpha_1 - \alpha_2) = \sin^2 \beta_{12}. \end{aligned}$$

Таким образом, показатель точности, полученный по двум линиям положения

$$D_r = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{\sin^2 \beta_{12}}. \quad (1)$$

В случае, если обсервация получена по пеленгу и дистанции одного ориентира, то

$$D_r = \sigma_{D1}^2 + \sigma_{P1}^2, \quad (2)$$

так как  $\beta_{12} = \pi/2$ .

Если определение места судна производится по трем линиям положения,

$$\begin{aligned} \Delta_r = & (\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_2 + \cos^2 \alpha_3)(\sin^2 \alpha_1 + \sin^2 \alpha_2 + \sin^2 \alpha_3) - \\ & - (\sin \alpha_1 \cos \alpha_1 + \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 + \sin \alpha_3 \cos \alpha_3)^2. \end{aligned}$$

После преобразований

$$\Delta_r = \sin^2 \beta_{12} + \sin^2 \beta_{13} + \sin^2 \beta_{23},$$

где  $\beta_{ij}$  - углы между градиентами соответствующих линий положения.

В этом случае показатель точности

$$D_r = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}{\sin^2\beta_{12} + \sin^2\beta_{13} + \sin^2\beta_{23}}. \quad (3)$$

Поэтому при оценке точности контроля места судна при плавании по заданному маршруту, когда навигационным оборудованием являются естественные или искусственные ориентиры, необходимо с помощью формул (1) ... (3) (в зависимости от числа и типа линий положения) рассчитать значения показателя точности для каждой точки маршрута следования и его максимальное значение будет определять величину точности плавания по проверяемому маршруту.

На рис. 1 показано поле точностей, создаваемое одиночным ориентиром, находящимся на мысе, причем для контроля места судна используется дистанция и пеленг, а значения показателя точности  $D_r$  в условных единицах рассчитаны по формуле (2). На маршруте плавания вблизи ориентира значения показателя точности изменяются от 22 до 34 единиц, и точность плавания на маршруте составляет 34 единицы.

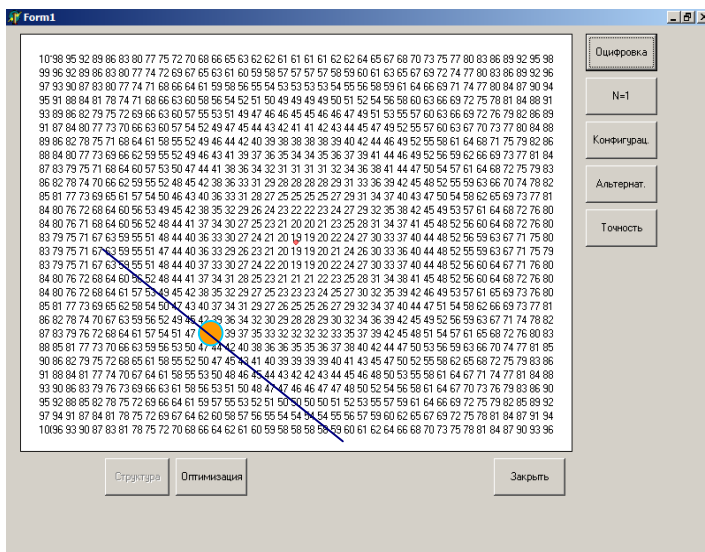


Рис. 1. Определение точности плавания по маршруту при использовании одиночного ориентира

В случае, если маршрут судна находится в районе плавания, оборудованном локальной обращенной радиолокационной системой или локальной системой, использующей корреляционные принципы навигации, то показатель точности, как показано в работах [6, 7]

$$D_r = \frac{\sum_{j=1}^N \left( \frac{1}{\sigma_{Dj}^2} + \frac{1}{\sigma_{Pj}^2} \right)}{\frac{1}{2} \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[ \left( \frac{1}{\sigma_{Di}^2 \sigma_{Dj}^2} + \frac{1}{\sigma_{Pi}^2 \sigma_{Pj}^2} \right) \sin^2 \beta_{ij} + \left( \frac{1}{\sigma_{Di}^2 \sigma_{Pj}^2} + \frac{1}{\sigma_{Pi}^2 \sigma_{Dj}^2} \right) \cos^2 \beta_{ij} \right] \right\}}, \quad (4)$$

где  $N$  – число РЛС в случае обращенной радиолокационной системы или число выбранных для наблюдения реперных знаков, при использовании корреляционных систем.

На рис. 2 показано точностное поле, создаваемое многопозиционной обращенной радиолокационной системой, состоящей из пяти РЛС, которые на рисунке показаны кругами. Значения показателя точности на маршруте плавания судна, показанного отрезком черного цвета, рассчитаны с помощью формулы (4), и изменяются от 16 до 18 условных единиц. Следовательно, точность плавания судна на заданном маршруте составляет 18 условных единиц.

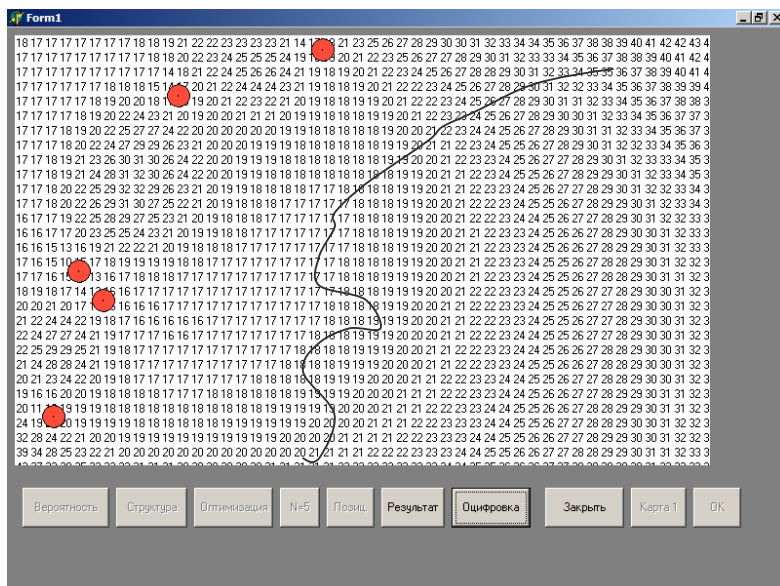


Рис. 2. Определение точности плавания по маршруту в районе действия обращенной радиолокационной системы

Таким образом, предлагаемый способ контроля точности плавания судна по заданному маршруту с учетом имеющегося берегового навигационного оборудования позволяет оценить точность плавания судна по заданному маршруту, а в случае необходимости произвести проверку соответствия имеющейся системы навигационного оборудования существующим требованиям по точности прибрежного плавания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабошин Е.А. Инструкция по навигационному оборудованию. – М.: МО СССР, 1977. – 286 с.
2. Алексишин В. Г. Оценка эффективности системы навигационного оборудования способом частотного анализа // Судовождение. - 2003. - № 6. - С. 9 - 15.
3. Алексишин В. Г. Разработка метода синтеза локальных систем навигационного оборудования стесненного района: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.16. – Одесса: ОНМА, 2004. – 24 с.
4. Широков В.М. Распределение погрешностей обсервации при использовании методов корреляционной навигации // Судовождение. – 2003. - С. 154 - 158.
5. Алексишин В.Г., Бузовский Д.А. Перспективы разработки навигационных систем обращенного типа // Судовождение. - 2005. - №9. - С. 3 - 6.
6. Алексишин В.Г., Бузовский Д.А. Выбор скалярного критерия точности для оценки эффективности структуры локальных навигационных систем // Судовождение. – 2005. - № 10. - С. 9 - 14.
7. Бузовский Д.А. Разработка способа контроля места судна многопозиционной радиолокационной системой: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.13. – Одесса: ОНМА, 2008. – 24 с.