

03;09

## Оценка гидродинамического качества движения морского объекта по внешним траекторным измерениям

© А.С. Девятисильный, В.М. Дорожко, В.М. Гриняк

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток  
E-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

Поступило в Редакцию 31 марта 2003 г.

Исследуется метод определения гидродинамического сопротивления движению объекта по двухкоординатным измерениям радара кругового обзора. Приводятся результаты численного полунатурного моделирования.

**1. Введение.** В нашей работе [1] рассмотрен способ оценки гидродинамического сопротивления морских объектов методом инерционного выбега. Этот метод позволяет, как следует из результатов конкретного эксперимента, на основе обработки данных одной траектории инерционного движения получать зависимость силы сопротивления среды от скорости движения, а также сравнивать волнообразующие свойства различных объектов.

При проведении этих исследований использовались данные траекторных измерений, получаемые штатными бортовыми навигационными средствами (лагами). Наряду с этим актуальным для практики представляется использование для этой цели внешних источников информации — береговых 2D-радаров, определяющих азимут и дальность до объекта. Прикладная значимость такого подхода определяется перспективами расширения навигационных и сервисных функций современных береговых систем управления движением, например, в части организации централизованного сбора данных для решения проблемы оперативного контроля состояния корпуса и загрузки судов.

Настоящая работа посвящена численно-экспериментальному обоснованию этого нового и важного для практики подхода к решению проблемы оценки гидродинамического сопротивления движению.

**2. Постановка задачи.** Задача состоит в том, чтобы по массиву измеренных береговым радаром инерционного выбега координат объекта

получить оценки его скорости, ускорения и в конечном итоге функцию гидродинамического сопротивления движению.

Введем декартовую систему координат  $oxy$ . В ней измерения радара могут быть формализованы следующим образом:

$$\begin{aligned} z_r(t_k) &= \sqrt{x^2(t_k) + y^2(t_k)} + \xi_r, \\ z_\varphi(t_k) &= \arctan(x(t_k)/y(t_k)) + \xi_\varphi. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $z_\varphi(t_k)$ ,  $z_r(t_k)$  — измеренные значения азимута и дальности до объекта в дискретные моменты времени  $t_k$ ;  $x(t_k)$ ,  $y(t_k)$  — координаты наблюдаемого объекта;  $\xi_r$ ,  $\xi_\varphi$  — инструментальные погрешности измерений.

В силу того что инерционное движение при свободном выбеге осуществляется вдоль прямой линии, оно, очевидно, может быть сведено к одномерному, а система уравнений измерений (1) соответственно — к одному уравнению

$$d(t_k) = f(z_r, z_\varphi, t_k), \quad k = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где  $d(t_k)$  должно интерпретироваться как „новое“ измерение расстояния, пройденного объектом от точки начала прямолинейного инерционного движения, а  $f(z_r, z_\varphi, t_k)$  — функция, являющаяся результатом линейной (на плоскости  $oxy$ ) регрессии данных измерений радара;  $n$  — число измерений.

К массиву измерений  $\{d(t_k)\}_{k=\overline{1, n}}$  теперь может быть применена технология обработки, изложенная в [1], если модель измерений (2) дополнить (как и в [1]) известной зависимостью [2]

$$r_d = -(1 + n_r)\ddot{d}, \quad (3)$$

где  $r_d$  — удельное (на единицу массы объекта) гидродинамическое сопротивление;  $d$  — расстояние, пройденное объектом при инерционном выбеге;  $n_r$  — поправочный коэффициент, учитывающий нестационарность движения и геометрию объекта.

Внешнее сходство рассматриваемой здесь задачи с задачей, исследованной в работе [1], очевидно. Вместе с тем иной характер исходной измерительной информации (двухкоординатные траекторные измерения вместо однокоординатных измерений расстояния и скорости) требует адекватной проверки и адаптации метода ее (задачи) решения

в новой ситуации. Последнее выполняется ниже в рамках численно-экспериментального исследования.

**3. Экспериментальные результаты.** В основе результатов, представляемых ниже, лежит концепция полунатурного компьютерного моделирования, включающая в себя построение модели движения объекта по данным физических измерений на борту объекта (т.е. по сути результаты, изложенные в [1]) и имитационное компьютерное моделирование ситуаций внешнего радиолокационного наблюдения.

Будем рассматривать случай одного берегового радара типа Raytheon с погрешностями измерения дальностей ( $\xi_r$ ) и азимутов ( $\xi_\varphi$ ), равномерно распределенных соответственно в интервалах  $[-6.25; 6.25]$  м и  $[-0.06; 0.06]^\circ$ , и периодом обращения антенны радара, равным 3 с. В полунатурном эксперименте использованы, как и в [1], данные реальных измерений для судна грузового класса „Витус Беринг“.

Фиксированные параметры модели: длина судна  $L = 150$  м; объемное водоизмещение  $V_{vol} = 20\,200$  м<sup>3</sup>; скорость судна в начале выбега  $v_1 = 8.2$  м/с; длительность инерционного движения 1500 с, соответствующее число измерений  $n = 501$ ; поправочный коэффициент  $n_r$  вводится как результат аппроксимации его типовых зависимостей [2] от скорости, длины и водоизмещения судна, а именно:

$$n_r = b_0 + b_1 v + b_2 v^2,$$

где

$$b_0 = 0.2017 - 0.0321\psi + 0.0010\psi^2,$$

$$b_1 = (-0.4871 + 0.1193\psi - 0.0034\psi^2) / \sqrt{gL},$$

$$b_2 = (5.9608 - 1.3284\psi + 0.0679\psi^2) / (gL),$$

$$\psi = L/V_{vol}^{1/3}; \quad g = 9.81 \text{ м/с}^2.$$

На рис. 1 показаны графики оцененных удельных сопротивлений инерционного движения судна в зависимости от его относительной скорости (значений числа Фруда  $Fr = v/\sqrt{gL}$ ). Кривая  $r_d$  (сплошная), принимаемая в качестве базовой, соответствует удельному сопротивлению судна, определенному с помощью лага. Кривая  $r'_d$  (пунктир) — одна из статистических реализаций (наихудшая) решения задачи (3). Точки  $A$  и  $A'$  соответствуют началу выбега судна; координаты точек

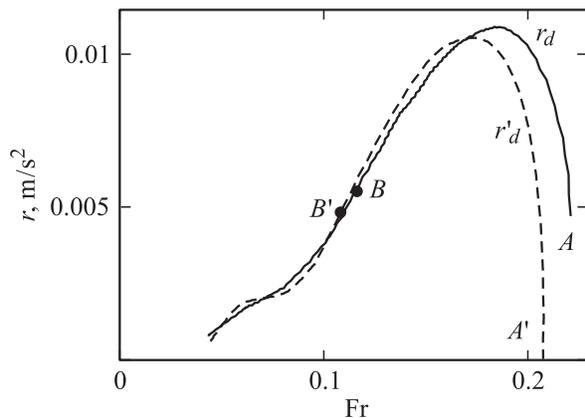


Рис. 1.

$B$  и  $B'$  на плоскости  $(Fr, r_d)$  могут служить мерами при сравнении волнообразующих свойств различных судов [1]. Как видно, оцененные с помощью радара значения удельного сопротивления  $r'_d$  несколько расходятся с базовыми.

Проведенное авторами исследование рассматриваемой задачи позволяет выявить количественные зависимости указанной расходимости в зависимости от параметров траектории судна (удаления от радара и направления движения). В качестве меры погрешности определения удельного сопротивления была принята величина  $rms(\delta r_d) = \|\delta r_d\| / (\sqrt{n}/r_d(B))$ , где  $\|\delta r_d\| = \|r_d - r'_d\|$  — евклидова норма вектора разностей значений удельного сопротивления, вычисленных по данным лага и радара,  $r_d(B)$  — значение удельного сопротивления в точке  $B$ ,  $n$  — число измерений. Мерой погрешности определения точки  $B$ , с учетом физических представлений, была выбрана величина  $\delta Fr_B = (Fr_B - Fr'_B)/Fr_B$ , где  $Fr_B$  и  $Fr'_B$  — значения чисел Фруда в точках  $B$  и  $B'$ , вычисленные с помощью лага и радара соответственно.

На рис. 2 представлены графики величин  $S_r = M[rms(\delta r_d)]$  (пунктир) и  $S_B = M[\delta Fr_B]$  (сплошная линия) как функций расстояния ( $R$ ) между начальной точкой выбега и радаром;  $M[*]$  — оператор осреднения. Осреднение выполнено на данных множественного эксперимента пакетным ортогональным вейвлетом Коифлета (coif4) с четырехуровневой декомпозицией. При этом  $S_r$  и  $S_B$  соответствуют наилучшей траектории объекта, когда курс его движения совпадает с

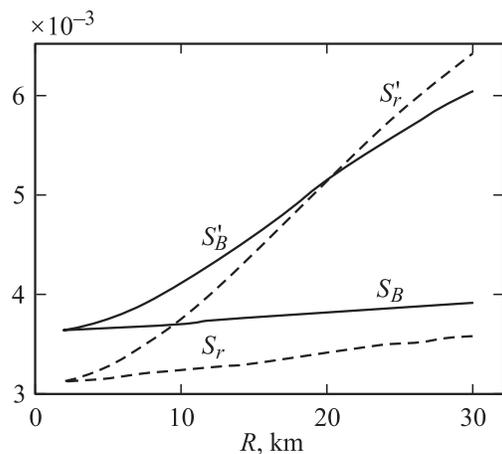


Рис. 2.

направлением на радар, а  $S_r'$  и  $S_B'$  — наихудшей траектории, когда курс объекта в начальной точке выбега перпендикулярен азимутной прямой радара. Учитывая статистический характер величин  $rms(\delta r_d)$  и  $\delta Fr_B$ , кроме средних были вычислены также их среднеквадратические отклонения соответственно от величин  $S_r$ ,  $S_r'$ ,  $S_B$ ,  $S_B'$ , которые составили:  $\sigma(\delta r_d) \approx 0.002 \text{ m/s}^2$ ,  $\sigma'(\delta r_d) \approx 0.003 \text{ m/s}^2$ ,  $\sigma(\delta Fr_B) \approx 0.08$ ,  $\sigma'(\delta Fr_B) \approx 0.09$ . Полученные оценки точности в условиях однопозиционного наблюдения являются не только вполне приемлемыми для практики, но и обнадеживающими с учетом реальной перспективы многопозиционного наблюдения.

В целом, как показывают приведенные результаты, разработанный в статье [1] способ обладает достаточными свойствами преимущества для ситуаций внешнего радиолокационного наблюдения.

## Список литературы

- [1] Девятисильный А.С., Дорошко В.М., Гриняк В.М. // ЖТФ. 2003. Т. 73. В. 2. С. 38–42.
- [2] Справочник по теории корабля. Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые двигатели / Под ред. Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. 768 с.