DOI: 10.36535/0236-1914-2021-04-4

УДК 681.5

СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ МОРСКОГО СУДНА ПО ИЗМЕРЕНИЯМ В НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Доктор техн. наук, профессор **Виноградов В. Н.**,
кандидат техн. наук, доцент **Ивановский Н. В.**
(Керченский государственный морской технологический университет)

SYNTHESIS OF ALGORITHMS FOR PARAMETER ESTIMATION MODELS OF A MARINE VESSEL MOVEMENT BASED ON MEASUREMENTS IN FULL-SCALE TESTS

V.N. Vinogradov, Doctor (Tech.), Professor,
N. V. Ivanovskiy, Ph.D. (Tech.), Associate Professor
(Kerch State Maritime Technological University)

Безопасность, риск, математическая модель, автоматическое управление, идентификация.

Safety, risk, mathematical model, automatic control, identification.

Рассматривается задача синтеза алгоритмов оценивания случайных параметров модели движения судна по измеряемой информации в натурных испытаниях и проводится анализ точности синтезированных алгоритмов. Полученные алгоритмы являются сравнительно простыми и позволяют в нереальном масштабе времени по зарегистрированным в натурных испытаниях измерениях оценить неизвестные параметры модели движения судна с высокой точностью. Полученные результаты могут быть использованы при построении автоматизированных систем управления судном, а также при разработке навигационных тренажеров, а именно при создании моделей судов.

The article considers the problem of synthesizing algorithms for estimating the random parameters of the ship movement model based on measured information in field tests and analyzes the accuracy of the synthesized algorithms. The obtained algorithms are relatively simple and allow, on an unrealistic time scale, to estimate the unknown parameters of the ship's motion model with high accuracy from the measurements recorded in field tests. The results obtained can be used in the construction of automated ship control systems, as well as in the development of navigation simulators, namely, in the creation of ship models.

Введение

Разработка алгоритмов автоматизированной системы управления конкретным судном проводится с использованием модели движения данного судна. Параметры модели движения судна могут существенно влиять на алгоритм управления судном [1]. При использовании модели движения судна возникает вопрос о соответствии моделируемых фазовых координат движения судна реальному движению судна. Ряд параметров судна, используемых в модели движения судна, задаются в виде априорных значений и требуют уточнения по натурной информации в процессе отработки автоматизированной системы управления. Для решения такой задачи необходимо синтезировать алгоритмы оценивания априорных параметров модели движения по натурной информации движения судна. Задача оценивания присоединенных масс и момента инерции судна рассматривалась в работе [2].

Постановка задачи. Модель движения судна представим в виде уравнений [3]:

$$
\begin{gathered}
\frac{dv_x}{dt} = \frac{\omega(m_{22}v_y + l_{26}\omega)}{m_{11}} - \frac{C_r(\delta-\beta)^2(v^2+\omega^2L_r^2)\rho}{2m_{11}} + \left(\frac{n_v^2}{m_{11}}\right)T_x + \left(\frac{n_v}{m_{11}}\right)vK_v + \frac{C_x(C_{x0},\beta)\rho S_{cp}v_2^2}{2m_{11}} \\
\frac{dv_y}{dt} = -\frac{\omega m_{11}v_x}{m_{22}} - \left(C_\beta\beta\left(1-\bar{\omega}^2\right) + C_{\omega\beta}\bar{\omega}\beta - C_{\omega\omega}\bar{\omega}\,|\,\bar{\omega}\,|\,\frac{A_p\left(v^2+\omega^2L_r^2\right)\rho}{2m_{22}} - m_yS_r\left(\delta-\beta\right)\left(v^2+\omega^2L_r^2\right)\right)\rho/2m_{22} \qquad (1) \\
\frac{d\omega}{dt} = \frac{v_x\left(m_{11}-m_{22}\right)\left(v_y+\frac{\omega l_{26}}{m_{22}}\right)}{J_Z} + \frac{\left(C_{m\beta}\beta v^2 - C_{m\omega}\bar{\omega}\left(v^2+\omega^2L_r^2\right)\right)A_pL\rho}{2J_Z} + \frac{m_yS_r\left(\delta-\beta\right)\left(v^2+\omega^2L_r^2\right)L_r\rho}{2J_Z},
\end{gathered}
$$

где

$$
v(t) = \left(v_x^2+v_y^2\right)^{\frac{1}{2}},\ \bar{\omega} = \frac{\omega L}{\left(v^2+\omega^2L^2\right)^{\frac{1}{2}}},\ \beta(t) = -\arcsin\left(\frac{v_y(t)}{v(t)}\right),
$$

$$
C_x\left(C_{x0},\beta\right) = -0{,}075\sin\left(\left(\pi-\arcsin\left(C_{x0}/0{,}075\right)\right)\left(1-|\beta|\right)\right),\ C_{m\beta}\left(\beta\right) = m_1\sin\left(2\beta\right)+m_2\sin\left(\beta\right).
$$

В выражениях (1) $m_{11} = m_c + \Delta m_{11}$, $m_{22} = m_c + \Delta m_{22}$ – масса судна с присоединенными массами воды; $J_{zp} = J_{zc} + \Delta J_{zp}$ – момент инерции судна с присоединенным моментом инерции воды; $v=\sqrt{v_x^2+v_y^2}$, $v_1=\sqrt{v^2+\left(\omega_z L\right)^2}$, $v_2=\sqrt{v^2+\left(\omega_z L_r\right)^2}$ – модули скоростей потока воды, соответственно, в районе центра масс судна, носа и руля;

$\beta=-\arcsin\dfrac{v_y}{v}$ – угол дрейфа; ρ - плотность воды; $q=\dfrac{\rho v^2}{2}$, $q_1=\dfrac{\rho v_1^2}{2}$, $q_2=\dfrac{\rho v_2^2}{2}$ – скоростные напоры; $\overline{\omega_z}=\dfrac{\omega_z L}{v_1}$, $\overline{\omega_r}=\dfrac{\omega_z L_r}{v_2}$ – относительные угловые скорости.

Параметры судна, такие как, L - длина судна, B - ширина судна, L_r – отстояние руля от центра масс, S_r – площадь руля и ряд других можно считать постоянными величинами. Гидродинамические коэффициенты сил и моментов зависят, как правило, от угла дрейфа и угловой скорости вращения судна и для конкретного судна определяются согласно выражениям, приведенным в [4].

Ряд параметров судна, такие, например, как Δm_{11}, Δm_{22} - присоединенные массы, ΔJ_{zp} - присоединенный момент инерции, T_{oc} – осадка судна и ряд других, являются случайными величинами. Эти случайные параметры можно определить, как некоторые расчетные (номинальные) – неслучайные величины и случайные отклонения от расчетных значений. Очевидно, что характеристики управляемости каждого конкретного судна будут зависеть от реализовавшихся случайных параметров судна.

Параметры модели T_x, K_v, C_{x0} и m_y будем считать случайными величинами с равновероятными законами распределения в интервалах $\left[T_{x\min},T_{x\max}\right]$, $\left[K_{v\min},K_{v\max}\right]$, $\left[C_{x0\min},C_{x0\max}\right]$, $\left[m_{y\min},m_{y\max}\right]$, все остальные параметры являются известными величинами.

Для оценивания случайных параметров модели T_x, K_v, C_{x0} проведем испытания судна при прямолинейном движении ($\delta(t)=0$) на полном ($n_v=n_{\max}$), среднем($n_v=n_{\max}/2$) и малом ($n_v=n_{\max}/4$) ходу. В процессе испытания на судне измеряются и регистрируются скорость судна $v_x^*(t_i)$, ускорения $a_x^*(t_i)$ и моменты времени измерений t_i. Уравнения модели прямолинейного движения (учитывая, что $v_y(t)=0$, $\beta(t)=0$, $\omega(t)=0$) запишутся в виде:

$$\frac{dv_x}{dt}=a_x(t)=\left(\frac{n_v^2}{m_{11}}\right)T_x+\left(\frac{n_v}{m_{11}}\right)v_x K_v+\frac{C_{x0}\rho S_{cp} v_x^2}{2m_{11}}. \quad (2)$$

Модель измерений можно представить в виде выражений

$$v_x^*(t_i)=v_x(t_i)+\sigma_v\xi_{vx}(t_i),\ a_x^*(t_i)=a_x(t_i)+\sigma_a\xi_{ax}(t_i), \quad (3)$$

где σ_v, σ_a – среднеквадратические ошибки измерений; $\xi_{vx}(t_i)$, $\xi_{ax}(t_i)$ – независимые белые шумы.

Для оценивания случайного параметра модели m_y (при известных оценках $\hat{T}_x$, $\hat{K}_v$, $\hat{C}_{x0}$) проведем испытания судна при циркуляции ($\delta(t)=\delta_m$, на полном ходу $n_v=n_{\max}$). Уравнения модели движения при циркуляции, согласно (1), запишутся в виде

$$\frac{dv_x}{dt}=a_x(t)=F_x\left(\omega,\delta_m,v_x,v_y,\hat{T}_x,\hat{K}_v,\hat{C}_{x0}\right),$$

$$\frac{dv_y}{dt}=a_y(t)=F_y\left(\omega,v_x,v_y\right)+m_y f\left(\omega,\delta_m,v_x,v_y\right),$$

$$\frac{d\omega}{dt}=a_\omega(t)=M\left(\omega,v_x,v_y\right)+m_y f\left(\omega,\delta_m,v_x,v_y\right)L_r m_{22}/J_Z. \quad (4)$$

При циркуляции, кроме измерений (3), измеряются также боковые скорость и ускорение, угловая скорость и угловое ускорение вращения судна

$$v_y^*(t_i)=v_y(t_i)+\sigma_v\xi_{vy}(t_i),\ a_y^*(t_i)=a_y(t_i)+\sigma_a\xi_{ay}(t_i),$$
$$\omega^*(t_i)=\omega(t_i)+\sigma_\omega\xi_\omega(t_i),\ a_\omega^*(t_i)=a_\omega(t_i)+\sigma_\omega\xi_{a\omega}(t_i). \quad (5)$$

По измеряемой натурной информации (3) и, соответственно (5), можно, используя простые линейные алгоритмы оценивания [5], построить оценки скоростей $\hat{v}_x(t_i),\hat{v}_y(t_i)$ и угловой скорости $\hat{\omega}(t_i)$. Линейный алгоритм оценивания, например, скорости $v_x(t)$ (аналогично $v_y(t)$, $\omega(t)$) определяется уравнениями:

$$K_v\left(t_i|t_{i-1}\right)=K_v\left(t_{i-1}\right)+\sigma_a^2,$$
$$P_v(t_i)=K_v\left(t_i|t_{i-1}\right)\Big/\left(K_v\left(t_i|t_{i-1}\right)+\sigma_v^2\right),\ K_v(t_0)=\sigma_v^2,$$
$$\hat{v}_x(t_i)=\hat{v}_x(t_{i-1})+a_x^*(t_{i-1})dt+P_v(t_i)\left(v_x^*(t_i)-\hat{v}_x(t_i)\right),$$
$$K_v(t_i)=K_v\left(t_i|t_{i-1}\right)-P_v(t_i)K_v\left(t_i|t_{i-1}\right), \quad (6)$$

где $K_v(t_i)$ – дисперсия оценивания скорости, $dt=t_i-t_{i-1}$ – временной интервал поступления измерений.

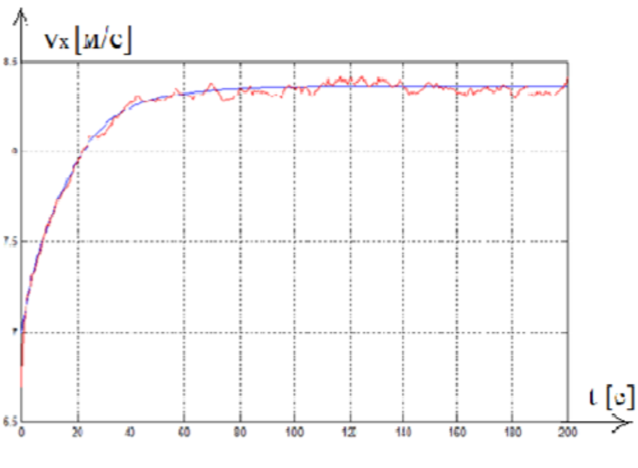

Рис. 1. Оценка скорости прямолинейного движения

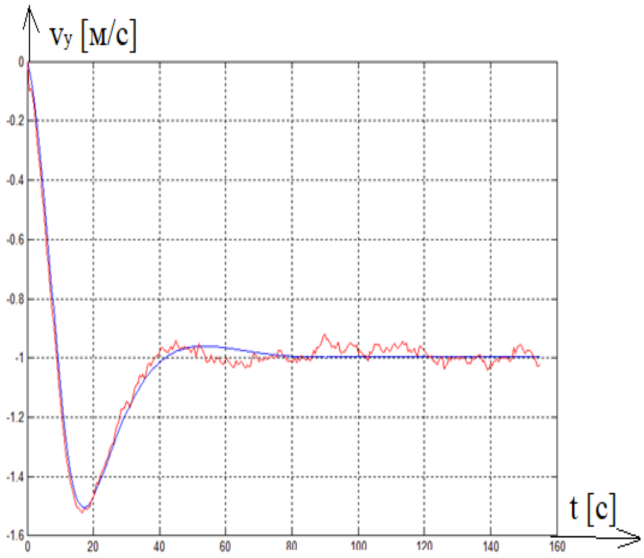

Рис. 2. Оценка V_y составляющей скорости при циркуляции

На Рис. 1-2 приведены реализации оценок скоростей и угловой скорости при моделировании прямолинейного движения на полном ходу судна типа Волга-Балт (Рис. 1) и при циркуляции (Рис. 2). Точность измерений $\sigma_v = 0{,}1$ м/с, $\sigma_a = 0{,}01$ м/с^2, временной интервал $dt = 0{,}5$ с.

Имея оценки скоростей и угловой скорости циркуляции судна, можно рассчитать функции в уравнениях (2), (4)

$$f_K\left(\hat{v}_x(t)\right) = \left(\frac{n_v}{m_{11}}\right)\hat{v}_x(t),\ f_{Cx0}\left(\hat{v}_x(t)\right) = \frac{\rho S_{cp}\hat{v}_x^2(t)}{2m_{11}},$$
$$F_y\left(\hat{\omega}(t),\hat{v}_x(t),v_y(t)\right),\ M\left(\hat{\omega}(t),\hat{v}_x(t),\hat{v}_y(t)\right),$$
$$f\left(\hat{\omega}(t),\delta_m,\hat{v}_x(t),\hat{v}_y(t)\right). \quad (7)$$

Измеряемое ускорение $a_x^*(t_i)$, согласно выражениям (2), (3), является линейным трендом случайных параметров T_x, K_v, C_{x0}:

$$a_x^*(t_i) = \left(\frac{n_v^2}{m_{11}}\right)T_x + f_K\left(\hat{v}_x(t)\right)K_v + f_{Cx0}\left(\hat{v}_x(t)\right)C_{x0} + \sigma_a\xi_{ax}(t_i). \quad (8)$$

Измеряемые ускорения $a_y^*(t_i)$, $a_\omega^*(t_i)$, согласно выражениям (4), (5), являются линейными трендами случайного параметра m_y:

$$a_y^*(t_i) = F_y\left(\hat{\omega}(t),\hat{v}_x(t),v_y(t)\right) + f\left(\hat{\omega}(t),\delta_m,\hat{v}_x(t),\hat{v}_y(t)\right)m_y + \sigma_a\xi_{ay}(t_i),$$

$$a_\omega^*(t_i) = M\left(\hat{\omega}(t),\hat{v}_x(t),\hat{v}_y(t)\right) + \frac{f\left(\hat{\omega}(t),\delta_m,\hat{v}_x(t),\hat{v}_y(t)\right)L_r m_{22}}{J_Z m_y} + \sigma_\omega\xi_{a\omega}(t_i). \quad (9)$$

Синтез алгоритмов оценивания параметров судна

Алгоритм оценивания вектора X случайных параметров по критерию минимума среднеквадратической ошибки, в общем случае, сводится к расчету условного среднего

$$\tilde{X}(t) = \int_{\Omega(X)} XP\left(X \middle| Y^*(\tau)\right)dX, \quad (10)$$

где $P\left(X \middle| Y^*(\tau)\right)$ апостериорная плотность вероятности вектора параметров X по измеряемой выборке вектора Y^* на временном интервале $t_0 \le \tau \le t$, $\Omega(X)$ область возможных значений вектора X.

Если построена достаточная статистика $\hat{X}(t) = \hat{X}\left(Y^*(\tau)\right)$, то апостериорную плотность вероятности, используя формулу Байеса, можно будет записать в виде

$$P\left(X \middle| Y^*(\tau)\right) = \frac{P\left(\hat{X}(t) \middle| X\right)P(X)}{\int_{\Omega(X)} P\left(\hat{X}(t) \middle| X\right)P(X)dX}. \quad (11)$$

Оценивание параметров при прямолинейном движении. При испытании судна на прямолинейном движении регистрируется вектор измерений

$$Y_p^*(t_i) = C_p(t_i)X_p + T_p(t_i)\xi(t_i), \quad (12)$$

где $C_p(t_i)$ – матрица измерений; $T_p(t_i)$ –матрица СКО ошибок измерений; X_p –вектор оцениваемых параметров

$$C_p(t_i) = \begin{bmatrix} n_m^2/m_{11},\ f_K\left(\hat{v}_{xp}(t)\right),\ f_{Cx0}\left(\hat{v}_{xp}(t)\right) \\ n_m^2/4m_{11},\ f_K\left(\hat{v}_{xc}(t)\right),\ f_{Cx0}\left(\hat{v}_{xc}(t)\right) \\ n_m^2/16m_{11},\ f_K\left(\hat{v}_{xm}(t)\right),\ f_{Cx0}\left(\hat{v}_{xm}(t)\right) \end{bmatrix},$$

$$T_p(t_i) = \begin{bmatrix} \sigma_a & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_a & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_a \end{bmatrix},\ X_p = \left[T_x, K_v, C_{x0}\right]. \quad (13)$$

Достаточная статистика $\hat{X}_p(t)$ – линейная оценка определяется уравнениями:

$$K_p(t_i) = K_p(t_{i-1}) - K_p(t_{i-1})C_p(t_i)^T\left(C_p(t_i)K_p(t_{i-1})C_p(t_i)^T + T_p(t_i)T_p^T(t_i)\right)^{-1}C_p(t_i)K_p(t_{i-1}),$$
$$P_p(t_i) = K_p(t_{i-1})C_p(t_i)^T\left(C_p(t_i)K_p(t_{i-1})C_p(t_i)^T + T_p(t_i)T_p^T(t_i)\right)^{-1},$$
$$\hat{X}_p(t_i) = \hat{X}_p(t_{i-1}) + P_p(t_i)\left(Y_p^*(t_i) - C_p(t_i)\hat{X}_p(t_{i-1})\right). \quad (14)$$

Условную вероятность линейной оценки при достаточно большой выборке измерений можно считать гауссовским распределением, в этом случае, например, оптимальная оценка параметра T_x, согласно (11), будет определяться выражением

$$\tilde{T}_x(t) = \hat{T}_x(t) + \sigma_T(t)\sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{\left(e^{-x_2^2} - e^{-x_1^2}\right)}{\operatorname{erf}(x_2, x_1)}, \qquad (15)$$

где $x_1 = \dfrac{\hat{T}_x(t) - T_{\min}}{\sqrt{2}\sigma_T(t)}$, $x_2 = \dfrac{\hat{T}_x(t) - T_{\max}}{\sqrt{2}\sigma_T(t)}$,

$\sigma_T(t) = \sqrt{K_{p11}(t)}$ $\operatorname{erf}(x_2, x_1) = \dfrac{2}{\sqrt{\pi}}\displaystyle\int_{x_1}^{x_2} e^{-x^2}dx$ – интеграл вероятности. Аналогично определяются оптимальные оценки параметров K_v, C_{x0}.

Оценивание параметров при циркуляции. При циркуляции регистрируется вектор измерений:

$$Y_ц^*(t_i) = F_ц(t_i) + C_ц(t_i)m_y + T_ц(t_i)\xi(t_i),$$

где

$$F_ц(t_i) = \begin{bmatrix} F_y\left(\hat{\omega}(t), \hat{v}_x(t), v_y(t)\right) \\ M\left(\hat{\omega}(t), \hat{v}_x(t), v_y(t)\right) \end{bmatrix},$$

$$C_ц(t_i) = \begin{bmatrix} f\left(\hat{\omega}(t), \delta_m, \hat{v}_x(t), \hat{v}_y(t)\right) \\ f\left(\hat{\omega}(t), \delta_m, \hat{v}_x(t), \hat{v}_y(t)\right)m_{22}/J_Z \end{bmatrix},$$

$$T_ц(t_i) = \begin{bmatrix} \sigma_a & 0 \\ 0 & \sigma_\omega \end{bmatrix} \qquad (16)$$

Линейная оценка параметра m_y определяется уравнением

$$\begin{gathered} \hat{m}_y(t_i) = \hat{m}_y(t_{i-1}) + P_ц(t_i)\cdot \\ \cdot\left(Y_ц^*(t_i) - F_ц(t_i) + C_ц(t_i)\hat{m}_y(t_{i-1})\right), \end{gathered} \qquad (17)$$

где вектор весов $P_ц(t_i)$ определяется аналогично уравнениям (14).

Оптимальная оценка параметра m_y определяется выражениями

$$\tilde{m}_y(t) = \hat{m}_y(t) + \sigma_m(t)\sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{\left(e^{-x_2^2} - e^{-x_1^2}\right)}{\operatorname{erf}(x_2, x_1)},$$

где

$$x_1 = \frac{\hat{m}_y(t) - m_{y\min}}{\sqrt{2}\sigma_m(t)}, \quad x_2 = \frac{\hat{m}_y(t) - m_{y\max}}{\sqrt{2}\sigma_m(t)},$$

$$\sigma_m(t) = \sqrt{K_ц(t)}, \qquad (18)$$

Выводы

В работе рассмотрена задача синтеза алгоритмов оценивания параметров модели движения судна по измеряемой информации в натурных испытаниях. Полученные алгоритмы являются сравнительно простыми и позволяют в нереальном масштабе времени по зарегистрированной в натурных испытаниях измерениях оценить неизвестные параметры модели движения судна с высокой точностью. Полученные результаты могут быть использованы при построении автоматизированных систем управления судном, а также при разработке навигационных тренажеров, а именно при создании моделей судов.

Литература

1. Виноградов В.Н., Ивановский Н.В., Новоселов Д.А. Анализ влияния случайных параметров судна на управляемость и безопасность. ВЕСТНИК Волжской государственной академии водного транспорта. Выпуск 55. Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ» Н. Новгород, 2018
2. Виноградов В.Н., Ивановский Н.В. Синтез алгоритмов идентификации случайных параметров и оценки текущих параметров движения судна. ВЕСТНИК Волжской государственной академии водного транспорта. Выпуск 57. Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ» Н. Новгород, 2018
3. Виноградов В.Н., Ивановский Н.В. Синтез алгоритма управления судном в заданной акватории на основе комплексного критерия риска. ВЕСТНИК Волжской государственной академии водного транспорта. Выпуск 59. Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ» Н. Новгород, 2019
4. Справочник по теории корабля. Т. 3. Под редакцией Я. И. Войткунского. Л: «Судостроение», 1985.
5. Zhilenkov A.A., Chernyi S.G. Automatic estimation of defects in composite structures as disturbances based on machine learning classifiers oriented mathematical models with uncertainties // Journal of Information Technologies and Computing Systems. 2020. № 3. С. 13-29.
6. Бородин Е.Л., Биденко С.И., Черный С.Г., Елизаров Д.А., Шестаков В.М. Идентификация оптических образов объектов в системах наблюдения беспилотных подводных аппаратов // Эксплуатация морского транспорта. 2020. № 1 (94). С. 83-87.
7. Чёрный С.Г., Жиленков А.А. Существование и достижимость консенсуса как проблема обеспечения надёжности в распределённых приложениях и киберфизических системах // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2020. Т. 16. № 2. С. 92-104.

Сведения об авторах:

Виноградов В.Н., профессор кафедры «Судовождение и промышленное рыболовство» в Керченском государственном морском университете.

Телефон 80656163451.

E-mail: invkerch@yandex.ru.

Ивановский Николай Владимирович, декан Морского факультета, доцент кафедры «Судовождение и промышленное рыболовство» в Керченском государственном морском университете.

Телефон 89780017923.

E-mail - inv8@mail.ru.

Адрес университета: 298309 г.Керчь, ул. Орджоникидзе, д. 82.