

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-150-158
УДК 623.9:007.52+623.983

О.В. Малышев¹, В.И. Эйдук², В.Г. Хорошев¹, А.В. Яковлев²

¹ ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

² ФГОУ Военный институт (Военно-морской политехнический) ФГКВОУ ВПО «Военный учебно-научный центр Военно-морского флота «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова», Санкт-Петербург, Россия

О СКРЫТНОСТИ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ РОБОТОТЕХНИКИ ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАНАЛОВ НЕКОНТАКТНЫХ ВЗРЫВАТЕЛЕЙ ДОННЫХ МИН

Объект и цель научной работы. Объекты морской робототехники. Цель исследования – получение оценок возможного влияния изменчивости фоновых условий на их скрытность от локальных электрометрических донных средств противника, таких как электрические каналы неконтактных взрывателей (НВ) донных мин.

Материалы и методы. Работа является дальнейшим развитием исследований по разработке путей анализа и обеспечения скрытности морских объектов на основе методологии системного подхода с использованием принципов теории оптимального обнаружения сигналов на фоне помех.

Основные результаты. Рассмотрены пути повышения электрической скрытности объектов морской робототехники. Предложена математическая модель для оценки возможных спектральных параметров придонной электрической помехи в зависимости от фоновых условий. Получены оценки возможных дистанций электрометрического обнаружения объектов локальными донными средствами в зависимости от электрического дипольного момента объекта, электропроводимости морской воды и интенсивности придонных электрических помех.

Заключение. Результаты исследований создают основу для нормирования параметров электрической заметности объектов морской робототехники и разработки способов управления данными объектами с учетом необходимости обеспечения их скрытности от электрических каналов НВ донных мин.

Ключевые слова: электрическая скрытность объектов морской робототехники, электрическое поле, электрический дипольный момент, оптимальное обнаружение, критерий Неймана – Пирсона.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-150-158
UDC 623.9:007.52+623.983

O. Malyshev¹, V. Eiduk², V. Khoroshev¹, A. Yakovlev²

¹ Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

² Naval Polytechnical Institute, N.G. Kuznetsov Naval Academy, St. Petersburg, Russia

ELECTRIC STEALTH OF MARINE ROBOTICS AGAINST NON-CONTACT SEABED MINES

Object and purpose of research. This paper investigates marine robots to estimate possible effect of environmental changes upon their stealth against local electrometric seabed threats, like non-contact mines.

Materials and methods. This paper continues the series of studies analyzing stealth of marine objects as per system-approach methodology and theoretical principles of optimal signal identification against noisy background.

Для цитирования: Малышев О.В., Эйдук В.И., Хорошев В.Г., Яковлев А.В. О скрытности объектов морской робототехники от электрических каналов неконтактных взрывателей донных мин. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 1(399): 150–158.

For citations: Malyshev O., Eiduk V., Khoroshev V., Yakovlev A. Electric stealth of marine robotics against non-contact seabed mines. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 1(399): 150–158 (in Russian).

Main results. The paper discusses possible ways for improving electric stealth of marine robotics and suggests a mathematical model for estimation of possible spectral parameters of near-seabed electric interference depending on the environment. The study yielded the estimates of possible electrometric detection for local seabed assets depending on electric dipole moment of the target, electric conductance of sea water and intensity of electric interference near the seabed.

Conclusion. The results of these studies pave way to the development of electric stealth standards for marine robotics, as well as to the development of marine robotic technology control methods taking into account the necessity to ensure their stealth for non-contact seabed mines with electric fuses.

Keywords: electric stealth of marine robotics, electric signature, electric dipole moment (EDM), optimal detection, Neyman-Pearson criterion.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

В современной войне на море все большую роль играют морские робототехнические комплексы (МРТК), которые применяют для решения широкого круга задач вооруженной борьбы.

Формулируя общие требования к объектам морской робототехники, основное внимание обычно уделяют их способности решать свойственные задачи, возможности оперативной модификации их структуры для различных функциональных назначений, разработке способов группового управления роботами и организации их взаимодействия, а также интеграции МРТК в системы более высокого уровня [1]. Внимание, уделяемое при этом скрытности действий МРТК, во многих случаях оказывается недостаточным.

В то же время обнаружение объектов робототехники средствами противника со значительной вероятностью приведет к их уничтожению либо подавлению. Поэтому одним из условий высокой эффективности применения МРТК является обеспечение достаточно высокой скрытности от средств наблюдения и управления оружием противника [2]. Значимость обеспечения малой заметности и высокой скрытности робототехнических комплексов военного назначения была отмечена в решении XIII Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» [3].

Постановка задачи оценки параметров скрытности объектов морской робототехники

Stealth assessment of marine robotics: formulation of task

К основным факторам, влияющим на скрытность морской робототехники, часто можно отнести необ-

ходимость действий на мелководье, в т.ч. в относительной близости от грунта.

В прибрежных районах с небольшими глубинами могут быть обнаружены и поражены донными средствами противника роботизированные средства, решающие различные задачи, в т.ч. противоминные, связанные с гидроакустической разведкой, сбором гидрографической и батиметрической информации, вскрытием противодесантной обороны противника, разведкой подводной инфраструктуры пунктов базирования [1].

Роботизированные объекты играют ведущую роль в современных противоминных действиях. Среди объектов с таким предназначением можно выделить обитаемые подводные аппараты (НПА), такие как зарубежные Double Eagle Mk 3, Mk 18 Mod. 2 Kingfish, Pluto Gigas и отечественные «Маевка», «Амулет», «Александрит-ИСПУМ», а также безэкипажные катера (БЭК), такие как зарубежные Inspector, Protector, ARCIMS, C-Sweep/Halcyon, CUSV и отечественные «Искатель», «Диамант».

Во многих случаях в состав противоминных МРТК входят БЭК, которые являются носителями НПА. Например, в состав французского противоминного комплекса входит БЭК Sterenn Du, доставляющий в миноопасный район средства поиска (НПА Alister-18, буксируемую DUBM-44, и самоходную гидроакустическую станцию миноискания (ГАСМ), средства классификации и уничтожения мин (K-ster) [2]. В случае обнаружения средствами противника НПА и БЭК, в т.ч. буксировщиков тралов и средств доставки поисковых НПА, они могут быть поражены как путем близкого подрыва мины, так и средствами самообороны перспективных минных комплексов – малогабаритными торпедами или суперкавитирующими снарядами.

Для выработки требований к параметрам заметности объектов – элементов МРТК – на основе оценок эффективности их применения необхо-

дима разработка математических моделей их действий при решении свойственных задач с учетом параметров, характеризующих боевую устойчивость [2]. Оценки таких параметров осуществляются на основе математических моделей обнаружения и поражения роботизированных объектов средствами противника, которые, в свою очередь, учитывают оценки параметров их скрытности от средств неприятеля (обычно дистанций обнаружения). При этом модели обнаружения и поражения должны учитывать все применяемые противником средства обнаружения, реагирующие на различные физические поля. Одной из моделей этого уровня должна быть модель для оценки параметра электрической скрытности – дистанции электрометрического обнаружения объекта в зависимости от его заметности.

Электрическую заметность относительно небольших, по сравнению с дистанциями обнаружения, морских объектов удобно характеризовать величиной электрического дипольного момента (ЭДМ). Основной причиной возникновения электрического поля (ЭП) морских объектов являются электрохимические процессы на контактирующих с морской водой деталях с различными электрод-

ными потенциалами. Поскольку в возникающей при этом электрической цепи поверхностное сопротивление электродов превышает сопротивление растеканию тока по морской воде, величины ЭДМ слабо зависят от фоновых параметров среды. Основной целью данной статьи является получение оценок возможного влияния фоновых условий на скрытность объектов морской робототехники от локальных электрометрических донных средств противника, таких как каналы неконтактных взрывателей донных мин.

ВМС различных стран для обнаружения морских объектов используют современные электрометрические средства (самостоятельные или в комплексе с другими датчиками) таких фирм, как Subspetection, Ultra Electronics (Великобритания), Polyamp AB (Швеция), Information Systems Laboratories (США), STL Systemtechnik Ludwig GmbH, Atlas Elektronik GmbH (Германия), Ocean Underwater Technology (Франция), MIS (Новая Зеландия), L3 Oceania (Австралия), SAES (Испания) (рис. 1).

Минимальный спектральный уровень собственных помех таких средств снижается от 20–25 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ на частоте 0,01 Гц, до 5–6 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ на частоте 0,1 Гц и до ≈ 1 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ на частоте 1 Гц [4]. Фоновые уровни помех в море существенно выше, поэтому собственные помехи необходимо учитывать только при малых расстояниях между измерительными электродами.

Типичным примером современной донной мины с электрическим каналом НВ является MINEA (Испания) [5], имеющая пять датчиков потенциала ЭП (рис. 1).

Диапазон возможных уровней фонового ЭП может быть весьма широким, его изменчивость отмечалась во многих работах, например в [6, 7]. Уровни придонного фонового ЭП анизотропны и даже для конкретной акватории могут существенно изменяться в зависимости от времени года и суток.

К наиболее значимым источникам фоновых электрических помех в мелком море относят вариации магнитного поля Земли (МПЗ), низкочастотную изменчивость течений и поверхностное волнение. Дополнительными причинами изменчивости поля могут быть биоэлектрические явления, перемещение взвешенных частиц и пузырьков, турбулентность и ряд других процессов. В акваториях портов и вблизи прибрежных промышленных объектов возникает интенсивная антропогенная помеха.

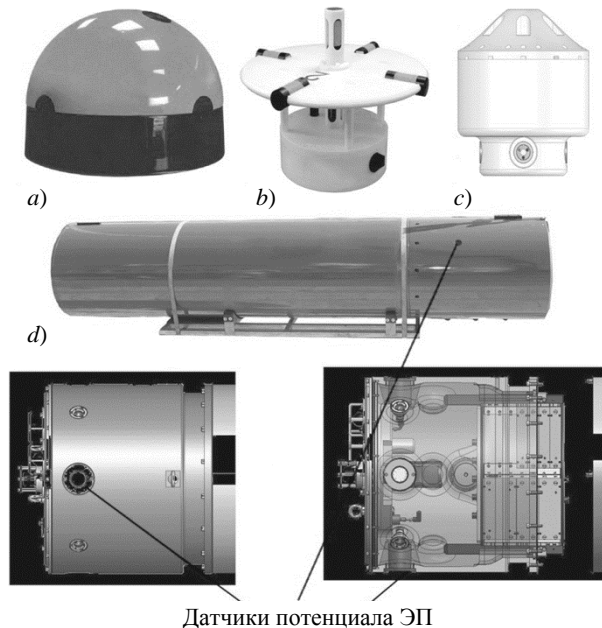


Рис. 1. Датчики электрического поля фирм Subspetection (a), Polyamp AB (b), Information Systems Laboratories (c), донные мины MINEA (d)

Fig. 1. Electric signature sensors by Subspetection (a), Polyamp AB (b), Information Systems Laboratories (c), MINEA seabed mines (d)

Оценка уровней фоновых электрических помех

Assessment of background electric interference level

Оценку уровней фоновых электрических помех целесообразно проводить в рамках трехслойной модели, предполагая воздух непроводящим, а воду и грунт – имеющими постоянные величины электропроводимости $\sigma_{w,g}$.

Поскольку морская вода обладает электрической проводимостью, вариации МПЗ индуцируют в ней электрические (теллурические) токи и поля. Для энергетического спектра низкочастотной горизонтальной составляющей ЭП $E_{\text{вар}}(f)$, возникающей при этом вблизи грунта, в [7] получено соотношение:

$$E_{\text{вар}}^r(f) = (2\pi f)^2 B_{\text{вар}}(f) [k_w sh(k_w H) - k_g ch(k_w H)]^{-2}, \quad (1)$$

где $B_{\text{вар}}(f)$ – спектр вариаций МПЗ в воздухе, k_w и k_g – волновые числа электромагнитных волн в воде и грунте соответственно, $k_{w,g} \approx \sqrt{i2\pi f \sigma_{w,g} \mu_0}$, H – глубина места.

Для моделирования спектра вариаций МПЗ $B_{\text{вар}}(f)$ может быть использовано соотношение:

$$B_{\text{вар}}(f) \approx a_1^2 \frac{2a_2}{a_2^2 + \omega^2} + a_3^2 \frac{2a_4}{a_4^2 + (a_5 - \omega)^2} + a_3^2 \frac{2a_4}{a_4^2 + (a_5 + \omega)^2}, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$, $a_1 = 0,995\sigma_{\text{вар}}$, $a_2 = 0,006$, $a_3 = 0,089\sigma_{\text{вар}}$, $a_4 = 0,117$, $a_5 = 0,145$. При спокойном состоянии магнитного фона среднеквадратичное отклонение (СКО) вариаций $\sigma_{\text{вар}}$ увеличивается с широтой и может составлять СКО $\approx 0,2-1$ нТл с возможным увеличением в несколько раз вблизи берегов или островов за счет влияния геоэлектрических неоднородностей проводимости.

Низкочастотную изменчивость течений описывают турбулентными моделями. В известной работе [8] получены соотношения для потенциала $U_{\text{теч}} = -\vec{B} \cdot \text{rot}(\vec{v})$, создаваемого вблизи непроводящего грунта горизонтальным течением со скоростью $v_y = v_T \cos[\pi x / (2b)]$, присутствующим только в верхнем слое моря толщиной h_T . Решение такой задачи для случая проводящего грунта и скорости v_T принимает вид:

$$E_1^r = -(\partial U_{\text{теч}} / \partial x) \Big|_{z=H} = -B_z \sigma_w [P_1(H, h_T, \beta) / P_2(H, h_T, \beta)] \cos(\beta x);$$

$$E_1^z = -(\partial U_{\text{теч}} / \partial z) \Big|_{z=H} = B_z \sigma_g [P_1(H, h_T, \beta) / P_2(H, h_T, \beta)] \sin(\beta x), \quad (3)$$

где $P_1(H, h_T, \beta) = sh(\beta h_T) [ch^2(\beta H) - sh^2(\beta H)]$, $P_2(H, h_T, \beta) = [ch^2(\beta h_T) - sh^2(\beta h_T)] [\sigma_w sh(\beta H) + \sigma_g ch(\beta H)]$, $\beta = \pi / (2b)$.

При отсутствии генерации турбулентности на масштабах интенсивного волнения степень спада спектра низкочастотных квазигоризонтальных движений изменчивости течений может быть принята равной -2 [9]. В этом случае спектральные уровни ЭП вблизи грунта, вызываемые изменчивостью течений, можно оценить как

$$E_{\text{теч}}^{r,z}(f) \approx (5 \cdot 10^{-5}) (\sigma_{\text{теч}} E_1^{r,z} / f)^2, \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{теч}}$ – СКО изменчивости течений в диапазоне $(10^4 - 1)$ Гц. Предположения о постоянном соотношении $\alpha_{\text{вр}}$ между вертикальными и горизонтальными размерами вихревых движений и средней скорости их смещения, равной $\langle u_T \rangle$, приводит к $\beta H = \pi H f / \langle u_T \rangle$ и $\beta h(f) = \pi H f / \langle u_T \rangle$ при $f < \alpha_{\text{вр}} \langle u_T \rangle / H$ и $\beta h_T(f) = \pi \alpha_{\text{вр}} \langle u_T \rangle / H$.

Решение для средней по направлениям распространения волн придонной помехи ЭП, вызываемой волнением с энергетическим спектром $S_B(f)$, получено в виде:

$$E_{\text{вол}}^z(f) = S_{\text{вол}}(f) (kg)^2 [2\pi f \cdot ch(kH)]^{-2} (B_T^2 / 2);$$

$$E_{\text{вол}}^r(f) = S_{\text{вол}}(f) (kg)^2 [2\pi f \cdot ch(kH)]^{-2} \times (B_z^2 C_1^2 / 2 + B_z^2 C_2^2). \quad (5)$$

где $C_1 = \{2k\gamma_g \exp[(k - \gamma_w)H] + k(k - \gamma_w) \times \exp(-2\gamma_w H) - k(k + \gamma_w)\} / C$;

$C_2 = \{-2k\gamma_w \exp[(k - \gamma_w)H] + (2\gamma_g - \gamma_w) \times \exp(-2\gamma_w H) - (2\gamma_g + \gamma_w)(k + \gamma_w)\} / C_3$;

$C_3 = (k - \gamma_w)(\gamma_w - \gamma_g) \exp(-2\gamma_w H) + (k + \gamma_w)(\gamma_w + \gamma_g)$;

$\gamma_w^2 = k^2 + i2\pi f \mu_0 \sigma_w$; $\gamma_g^2 = k^2 + i2\pi f \mu_0 \sigma_g$;

$k = k(f)$ – волновое число, $k \cdot th(kH) = (2\pi f)^2 / g$; $B_{T,z}$ – горизонтальная и вертикальная составляющие индукции МПЗ.

Спектр поверхностного волнения $S_{\text{вол}}(f)$ должен учитывать не только ветровое волнение, но и более низкочастотное гравитационное. В работе [10] предложено соотношение, связывающее средний уровень спектра гравитационного волнения S_{ig} в диапазоне частот 0,01–0,1 Гц с максимальным уровнем спектра ветрового волнения $S_{\text{вол}}^{\text{max}}$ в виде $S_{ig} = k_{ig} (S_{\text{вол}}^{\text{max}})^{0,85}$ (размерности уровней спектров $\text{м}^2/\text{Гц}$, $\langle k_{ig} \rangle = 8,9 \cdot 10^{-4}$, $k_{ig} \in (1,6-48) \cdot 10^{-4}$ с веро-

ятностью 0,7). Модельный широкополосный спектр поверхностного волнения составлен из низкочастотного спектра с уровнем S_{ig} и спектра развитого ветрового волнения Пирсона – Московича [11].

Суммарный спектр фоновой придонной электрической помехи, создаваемой рассмотренными основными процессами, можно записать, как

$$E_{\text{пом}}(f) = E_{\text{вар}}(f) + E_{\text{теч}}(f) + E_{\text{вол}}(f). \quad (6)$$

Спектр (6) позволяет оценивать вероятный диапазон параметров фоновых помех и его изменчивость в зависимости от наиболее важных влияющих факторов, однако для прогнозирования помехи в конкретной акватории его использование требует информации о реализующихся величинах влияющих параметров. Кроме того, свой вклад в помеху могут вносить неучтенные турбулентные, биологические и др. процессы.

На рис. 2 показаны результаты оценок диапазона спектров помехи, соответствующих (7) при изменении параметров фоновых условий в диапазонах $\sigma_{\text{вар}} = 0,3\text{--}3$ нТл, $\sigma_{\text{теч}} = 0,005\text{--}0,1$ м/с, $\sigma_{\text{вол}} = 0,005\text{--}1$ м, $\sigma_w = 0,3\text{--}4$ См/м, $\sigma_g = 0,3\text{--}10^{-4}$ См/м, предполагалось $H = 30$ м, $\langle u_T \rangle = 0,05$ м/с, $\alpha_{\text{вг}} = 0,05$.

На рис. 2 также показаны несколько сглаженных экспериментальных спектров помехи ЭП в Балтийском [12, 13], Черном [8] и Охотском морях. Они соответствуют области наиболее вероятных параметров фоновых помех, за исключением спектров, полученных в акваториях портов.

Минимальные уровни помех (СКО $\approx 0,1\text{--}0,3$ мкВ/м) определяются интенсивностью вариаций МПЗ. Как показывают оценки, в зависимости от интенсивности динамических процессов в акватории энергетические уровни помех могут увеличиваться на 3–4 порядка (до СКО $\approx 20\text{--}40$ мкВ/м),

а в условиях интенсивных прибрежных техногенных помех – на 5–6 порядков (до СКО $\approx 150\text{--}170$ мкВ/м). Такой диапазон возможных параметров помех приводит к существенной изменчивости электрической скрытности морской робототехники в зависимости от реализующихся фоновых условий.

Оценка дистанций электromетрического обнаружения объектов морской робототехники

Assessment of electrometric detection distance for marine robots

Оценки возможных дистанций обнаружения ЭП объектов МРТК были получены с использованием теории оптимального (по критерию Неймана – Пирсона) обнаружения сигналов на фоне случайных помех.

В трехслойной модели потенциал, создаваемый в водной среде электрическим (токовым) дипольным моментом (ЭДМ) \vec{P} с координатами $(x_0 = 0, y_0 = 0, h)$, можно представить в виде соотношения [14]:

$$U_w = \frac{1}{4\pi\sigma_w} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} k_{wg}^n \left[\frac{Q_{xy} - P_z(z+h)}{R_{10}^3} - \frac{Q_{xy} + P_z(z-h)}{R_{20}^3} + \frac{Q_{xy} - P_z(z+h-2nH)}{R_{1n}^3} + \frac{Q_{xy} + P_z(z-h+2nH)}{R_{2n}^3} + \frac{Q_{xy} + P_z(z-h-2nH)}{R_{3n}^3} + \frac{Q_{xy} - P_z(z+h+2nH)}{R_{4n}^3} \right] \right\}, \quad (7)$$

Спектральный уровень помехи, мкВ²/Гц

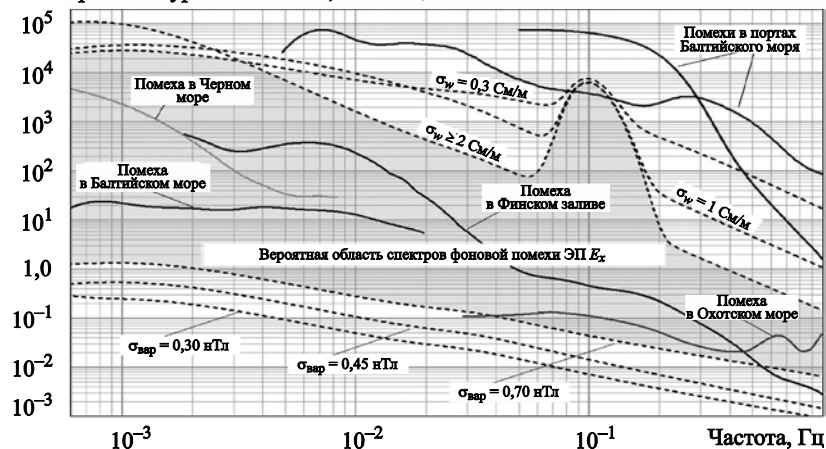


Рис. 2. Результаты оценок вероятной области спектров фоновой помехи обнаружению электрического поля морских объектов в мелководных районах

Fig. 2. Estimates of probable spectral interference domain for electric detection of marine objects in shallow-water areas

где $Q_{xy} = P_x(x_0 - x) + P_y(y_0 - y)$;
 $R^2_{1n} = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z + h - 2nH)^2$;
 $R^2_{2n} = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - h - 2nH)^2$;
 $R^2_{3n} = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - h + 2nH)^2$;
 $R^2_{4n} = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z + h + 2nH)^2$;
 $k_{wg} = (\sigma_w - \sigma_g)/(\sigma_w + \sigma_g)$.

Прходные кривые $X^0, Y^0, Z^0(t)$ сигнала ЭП, создаваемого вблизи грунта объектом, движущимся на глубине h вдоль оси x со скоростью v_0 , несложно получать, заменяя x на $x - v_0t$, считая y равным траверзному расстоянию прохода и численно дифференцируя (7) по координатам вблизи $z = H$.

Оценки вероятности обнаружения осуществлялись путем статистического определения вероятности превышения величиной отношения правдоподобия (ОП) Λ определенного порога Π_Λ :

$$\Lambda = \sum_i \exp \left[-\mu_i / 2 + \sum_k \left[q_{i,k}^x (X_k^n + X_k^0) + q_{i,k}^y (Y_k^n + Y_k^0) + q_{i,k}^z (Z_k^n + Z_k^0) \right] \right] > \Pi_\Lambda, \quad (8)$$

где $\mu_i = \sum_{j,k} (Q_{j,k}^x X_k^{(i)} X_j^{(i)} + Q_{j,k}^y Y_k^{(i)} Y_j^{(i)} + Q_{j,k}^z Z_k^{(i)} Z_j^{(i)})$;
 $q_{i,k}^x = \sum_j Q_{j,k}^x X_j^{(i)}$; $q_{i,k}^y = \sum_j Q_{j,k}^y Y_j^{(i)}$; $q_{i,k}^z = \sum_j Q_{j,k}^z Z_j^{(i)}$;

где Q^x, Q^y, Q^z – обратные матрицы автокорреляции сигналов помехи по осям; X^n, Y^n, Z^n – выборки фоновой помехи.

Индекс i нумерует возможные проходные кривые ЭП объекта $X^{(i)}, Y^{(i)}, Z^{(i)}$ в заданном интервале параметров ЭДМ объекта и его прохода, индексы j, k нумеруют точки проходных кривых и выборок помехи.

Генерация выборок помехи осуществлялась путем построения авторегрессионных соотношений с нормально распределенным случайным слагаемым. Для получения необходимого спектра коэффициенты авторегрессии рассчитывались с использованием системы уравнений Юла – Уокера с учетом значений предполагаемой автокорреляционной функции помехи. Для оценок величин порогов Π со средним временем между превышениями на фоне $T_{пт}$ генерировались модельные выборки ОП при регистрации фоновой помехи и строились зависимости частот превышения различных порогов p_h от их величин h_Λ :

$$p_h(h_\Lambda) = \begin{cases} 0 & \text{при } h_\Lambda < h_\Lambda^0 \\ \gamma_\Lambda \exp[-\gamma_\Lambda (h_\Lambda - h_\Lambda^0)] & \text{при } h_\Lambda \geq h_\Lambda^0 \end{cases} \quad (9)$$

Оценки величины порога и ее дисперсии рассчитывались следующим образом:

$$\Pi_\Lambda = -\hat{\beta}_2^{-1} [\ln(N_h T_{пт} / T_N) + \hat{\beta}_1];$$

$$(\delta \Pi_\Lambda)^2 = \hat{\beta}_2^{-2} [\sigma_{\beta_1}^2 + \Pi_\Lambda^2 \sigma_{\beta_2}^2], \quad (10)$$

где $\hat{\beta} = (X^T \Omega^{-1} X)^{-1} (X^T \Omega^{-1} Y)$, N_h – общее число выбросов, T_N – длительность выборки, $\sigma_{\beta_i}^2 = (X^T \Omega^{-1} X)^{-1}_{i,i} \sigma_s^2$,

$$\Omega_{i,i} = \ln^2[(\sqrt{n_i} + 1) / (\sqrt{n_i} - 1)] / 4,$$

$$\sigma_s^2 = [(Y - X \hat{\beta})^T \Omega^{-1} (Y - X \hat{\beta})] / (m_h - 3), \quad X_{j,1} = 1,$$

$X_{j,2} = \Pi_{\Lambda_j}$, $Y_j = \ln(n_j / N_h)$, n_j – числа выбросов, попавших в интервалы Δ_{h_j} , m_h – число интервалов.

На рис. 3 и 4 показаны результаты оценок дистанций обнаружения ЭП объектов с ЭДМ в диапа-

Рис. 3. Оценки возможных дистанций обнаружения электрического поля морских объектов с ЭДМ 0,0035–0,1 А·м при проводимости морской воды 0,3–1 См/м

Fig. 3. Estimates of possible electric detection distances for marine objects with EDM = 0.0035–0.1 A·m: sea water conductance 0.3–1 S/m



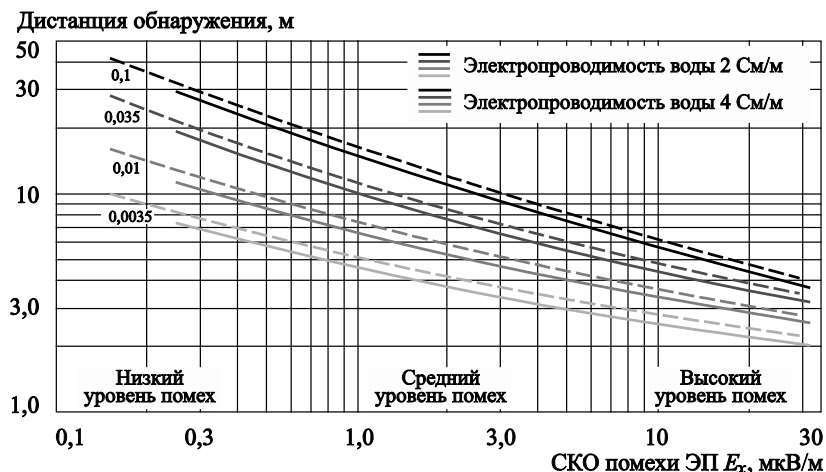


Рис. 4. Оценки возможных дистанций обнаружения электрического поля морских объектов с ЭДМ 0,0035–0,1 А·м при проводимости морской воды 2–4 См/м

Fig. 4. Estimates of possible electric detection distances for marine objects with EDM = 0.0035–0.1 A·m: sea water conductance 2–4 S/m

зоне ($3,5 \cdot 10^{-3} - 10^{-1}$) А·м в зависимости от СКО фоновой помехи при среднем времени между ложными срабатываниями электрического канала НВ $T_{лт} = 10^4$ с.

Кривые рис. 3 предполагают условия, характерные для Балтийского моря ($\sigma_w = 0,3 - 1$ См/м, $\sigma_{вар} \geq 0,45$ нТл). Оценки показывают, что в диапазоне достаточно вероятных фоновых условий дистанция обнаружения ЭП объектов МРТК может изменяться в 6–10 раз. Например, для объекта с ЭДМ, равным 0,1 А·м, дистанции могут составить 4–6 м в акватории порта, и 40–60 м в штилевых условиях без техногенной помехи и со спокойным геомагнитным фоном. Максимальные дистанции реализуются в распресненной воде, т.к. в ней увеличивается ЭП объекта, помеха изменяется в меньшей степени.

Кривые рис. 4 соответствуют условиям Черного моря ($\sigma_w = 2$ См/м, $\sigma_{вар} \geq 0,3$ нТл) и Баренцева моря ($\sigma_w = 4$ См/м, $\sigma_{вар} \geq 0,7$ нТл). С увеличением электропроводности воды диапазон изменений дистанции обнаружения несколько снижается и составляет 5–8 раз для Черного моря и 4–5 раз для Баренцева (а также для дальневосточных морей).

Заключение

Conclusion

Полученные оценки свидетельствуют о существенном влиянии на электрическую скрытность объектов морской робототехники фоновых условий – электропроводности воды и грунта, а также интенсивности динамических процессов в акватории.

Возможный диапазон изменчивости фоновых условий и связанной с ними электрической скрыт-

ности морской робототехники необходимо учитывать при анализе эффективности вариантов создания МРТК, обосновании тактико-технических требований и норм для параметров заметности объектов, разработке методов и средств снижения электрической заметности объектов и ее контроля, типовых моделей и тактических приемов применения робототехники для решения свойственных (в т.ч. противоминных) задач, отработке режимов работы и тактики функционирования системы управления их действиями.

Вследствие изменчивости параметров фоновых электрических помех заблаговременное прогнозирование дистанций обнаружения объектов электрическим каналом НВ донной мины может оказаться недостаточно точным. В связи с этим представляется целесообразным измерение параметров фоновых условий, в т.ч. параметров фоновых электрических помех акватории, непосредственно в ходе применения роботизированных объектов. Использование этой информации позволит получать текущие оценки электрической скрытности объектов и осуществлять управление их действиями с учетом необходимости обеспечения боевой устойчивости.

Список использованной литературы

1. Николаев А.Б. Морская военная робототехника: Современное состояние и перспективы // Робототехника и техническая кибернетика. 2017. № 1(14). С. 9–21.
2. Малышев О.В., Хорошев В.Г., Эйдук В.И. О скрытности применения морских робототехнических комплексов // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2018. Вып. 4(386). С. 191–202. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-191-202.

3. Современные научно-технические задачи развития отечественных морских робототехнических комплексов / Ю.И. Александров, О.В. Малышев, Л.Н. Попов, В.Г. Хоросhev // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2019. № 4(390). С. 245–252. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-245-252.
4. Underwater Electric field sensors UEP/ELFE [Электронный ресурс] : Specifications // Polyamp AB : [site]. Sollentuna, 2019. 4 p. URL: <https://systems.polyamp.com/file-archive/documentations/11-uep-elfe-sensor-and-amplifiers/file.html> (дата обращения: 29.11.2021).
5. MINEA : Multi-influence Naval Mine: Cylindrical Bottom Live Version [Электронный ресурс] // SAES : [site]. Cartagena, 2018. 2 p. URL: https://electronica-submarina.es/wp-content/uploads/2018/08/SAES_MINEA_CombatMultiinfluenceNavalMine_english.pdf (дата обращения: 29.11.2021).
6. Деменицкая Р.М., Иванов С.С., Литвинов Э.М. Естественные физические поля океана. Ленинград : Недра, 1981. 272 с.
7. Доронин Ю.П., Степанюк И.А. Электромагнитное поле океана. Санкт-Петербург : Рос. гос. Гидрометеорол. ин-т, 1992. 87 с.
8. Шулейкин В.В. Физика моря. 4-е изд., перераб. и доп. Москва : Наука, 1968. 1072 с.
9. Монин А.С., Озмидов Р.В. Океанская турбулентность. Ленинград : Гидрометеоздат, 1981. 320 с.
10. Эйдук В.И., Зобаев Д.В. Об управлении гидродинамической скрытностью подводных объектов // Управление в морских системах (УМС-2018): материалы конференции. Санкт-Петербург : Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 163–166.
11. Теоретические основы и методы расчета ветрового волнения / [А.Т. Гургенидзе и др.]. Ленинград : Гидрометеоздат, 1988. 262, [1] с.
12. Доманицкий Е.А., Струнский М.Г. Измерения естественного электрического поля в море // Океанология. 1964. Т. 4. № 2. С. 325–338.
13. Analysis of underwater acoustic and electric noise in the port of Gothenburg / S. Petrovic, E. Dalberg, R.K. Lennartsson, L. Persson // Oceans-2008: [conference proceedings]. Piscataway: IEEE, 2008. P. 855–859. DOI:10.1109/OCEANS.2008.5151929.
14. Ивлиев Е.А. Физические поля морских объектов. Электромагнитное и гидродинамическое поля. Санкт-Петербург : СПбГМТУ, 2011. 481 с.
2. O. Malyshev, V. Khoroshev, V. Eiduk. Ensuring stealth of marine robots // Transactions of Krylov State Research Centre, 2018, Issue 4(386), pp. 191–202, DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-191-202 (in Russian).
3. Yu. Aleksandrov, O. Malyshev, L. Popov, V. Khoroshev. Current scientific and technical challenges in Russian marine robotics // Transactions of Krylov State Research Centre. 2019, № 4(390), pp. 245–252, DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-245-252 (in Russian).
4. Underwater Electric field sensors UEP/ELFE [Электронный ресурс] : Specifications // Polyamp AB : [site]. Sollentuna, 2019. 4 p. URL: <https://systems.polyamp.com/file-archive/documentations/11-uep-elfe-sensor-and-amplifiers/file.html> (дата обращения: 29.11.2021).
5. MINEA : Multi-influence Naval Mine: Cylindrical Bottom Live Version [Электронный ресурс] // SAES : [site]. Cartagena, 2018. 2 p. URL: https://electronica-submarina.es/wp-content/uploads/2018/08/SAES_MINEA_CombatMultiinfluenceNavalMine_english.pdf (дата обращения: 29.11.2021).
6. R. Demenitskaia, S. Ivanov, E. Litvinov. Natural physical signature. Leningrad : Nedra, 1981, pp. 272 (in Russian).
7. Yu. Doronin, I. Stepaniuk. Electromagnetic field of the Ocean. St. Petersburg : Russian State Hydro-meteorological Institute, 1992, pp. 87 (in Russian).
8. V. Shuleikin. Marine physics. 4th ed., rev. and enl. Moscow : Nauka, 1968, pp. 1072 (in Russian).
9. A. Monin, R. Ozmidov. Ocean turbulence. Leningrad : Gidrometeoizdat. 1981, 320 pp. (in Russian).
10. V. Eiduk, D. Zibaev. Hydrodynamic stealth management of marine objects // Marine system management 2018: conference proceedings. St. Petersburg, Concern “CSRI Elektropribor”, 2018, pp. 163–166 (in Russian).
11. A. Gurgeniidze et al. Theoretical foundations and calculation methods for wind-induced waves. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1988, pp. 262 [1] (in Russian).
12. E. Domanitskii, M. Strunskii. Measurements of background electric signature at sea // Okeanologiya. 1964, Vol. 4, No 2, pp. 325–338 (in Russian).
13. Analysis of underwater acoustic and electric noise in the port of Gothenburg / S. Petrovic, E. Dalberg, R.K. Lennartsson, L. Persson // Oceans-2008: [conference proceedings]. Piscataway: IEEE, 2008. pp. 855–859. DOI:10.1109/OCEANS.2008.5151929.
14. Ye. Ivliev. Stealth of marine objects: radar and wake signatures. St. Petersburg State Maritime University, 2011, pp. 481 (in Russian).

References

1. A. Nikolaev. Naval robotics: State of the art and prospects // *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* (Robotics and technical cybernetics). 2017, № 1(14), pp. 9–21 (in Russian).

Сведения об авторах

Малышев Олег Викторович, к.т.н., доцент, главный ученый секретарь ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-49-90. E-mail: o_malyshev@ksrc.ru.

Эйдук Вячеслав Игоревич, к.т.н., доцент, профессор кафедры ФГОУ Военный институт (Военно-морской политехнический) ФГКВОУ ВПО «Военный учебно-научный центр Военно-морского флота «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова». Адрес: 196602, Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, Кадетский бул., д. 1. Тел.: +7 (812) 465-27-00. E-mail: vunc-vmf-vmii@mil.ru.

Хорошев Виталий Геннадьевич, д.т.н., с.н.с., заместитель генерального директора по кораблестроению и судостроению, ядерно-радиационной безопасности ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 386-67-69. E-mail: v_horoshev@ksrc.ru.

Яковлев Андрей Викторович, преподаватель кафедры ФГОУ Военный институт (Военно-морской политехнический) ФГКВОУ ВПО «Военный учебно-научный центр Военно-морского флота «Военно-морская академия име-

ни Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова». Адрес: 196602, Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, Кадетский бул., д. 1. Тел.: +7 (812) 465-27-00. E-mail: vunc-vmf-vmii@mil.ru.

About the authors

Oleg V. Malyshev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Chief Scientific Secretary, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-49-90. E-mail: o_malyshev@ksrc.ru.

Vyacheslav I. Eiduk, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Lead Researcher, Naval Polytechnical Institute of N.G. Kuznetsov Naval Academy. Address: 1, Kadetsky Bulvar, Pushkin, St. Petersburg, Russia, post code 196602. Tel.: +7 (812) 465-27-00. E-mail: vunc-vmf-vmii@mil.ru.

Vitaly G. Khoroshev, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Deputy Director General for Naval and Commercial Shipbuilding and Nuclear and Radiation Safety, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 386-67-69. E-mail: v_horoshev@ksrc.ru.

Andrey V. Yakovlev, Lecturer, Naval Polytechnical Institute of N.G. Kuznetsov Naval Academy. Address: 1, Kadetsky Bulvar, Pushkin, St. Petersburg, Russia, post code 196602. Tel.: +7 (812) 465-27-00. E-mail: vunc-vmf-vmii@mil.ru.

Поступила / Received: 11.09.21
Принята в печать / Accepted: 09.03.22
© Коллектив авторов, 2022