

му значению. Расчеты, выполненные по (8) с использованием модели [1, 13] для различных модификаций ПИА, показали, что поправка μ может составлять от нескольких до 40 дБ; уменьшается при увеличении измерительной базы; больше для узконаправленных антенн. Отметим, что при измерениях в любых водоемах должно выполняться условие $R_{\text{и}} > Sf/c$.

Заключение. При измерениях полевых характеристик параметрических излучающих антенн следует до выполнения экспериментов проверить динамический диапазон приемных измерительных трактов, так как при нелинейности последних регистрируемые данные не соответствуют истинным характеристикам, связанным с нелинейным взаимодействием волн в среде распространения. Нелинейность измерительных трактов также требуется контролировать при измерениях характеристик параметрических приемных антенн [1, 4, 13]. При оценке характеристик ПИА по дальнему полю необходимо учитывать поправки, связанные с выполнением измерений в зоне взаимодействия, что повысит точность прогнозирования параметров систем с использованием параметрических излучающих трактов.

Л и т е р а т у р а

1. Новиков Б. К., Тимошенко В. И. Параметрические антенны в гидролокации. Л.: Судостроение, 1989.
2. Александров В. А., Железный В. Б., Островский Д. Б. О параметрических излучателях для океанографических исследований // Гидроакустичний журнал (НАН України). 2004. № 1. С. 49—53.
3. Гаврилов А. М. Нелинейный метод измерения амплитудно-частотной характеристики приемника акустических волн // Измерительная техника. 2014. № 6. С. 58—62.

4. Воронин В. А., Тарасов С. П., Тимошенко В. И. Гидроакустические параметрические системы. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004.

5. Островский Д. Б. Введение в нелинейную гидроакустику. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009.

6. Колесников А. Е. Акустические измерения. Л.: Судостроение, 1983.

7. Пат. 5790474 США. Active sonar for under-ice conditions / P. L. Feintuch. 1998.

8. Moffett M. B., Mellen R. H. Model for parametric acoustic sources // JASA. 1977. V. 61. N. 2. P. 325—337.

9. Ивлиев С. В. Оценка нелинейных характеристик гидрофонов // Судостроение за рубежом. 1985. № 2. С. 82—84.

10. Пат. 67370 РФ. Устройство для измерения характеристик параметрических излучающих антенн / С. А. Борисов, Д. Б. Островский // Изобретения. Полезные модели. 2007. № 28.

11. Железный В. Б., Островский Д. Б. О совершенствовании схемы измерений характеристик параметрического излучателя // Судостроительная промышленность. Общие вопросы судостроения. Стандартизация и метрология. 1992. Вып. 13. С. 59—64.

12. Берктей Х. О. Некоторые явления в подводной акустике, связанные с волнами конечной амплитуды // Подводная акустика / Под ред. В. М. Алберса. М.: Мир, 1970. С. 325—346.

13. Новиков Б. К., Руденко О. В., Тимошенко В. И. Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981.

14. Железный В. Б. Параметрическое взаимодействие на сферических и цилиндрических волнах // Прикладная акустика (Таганрог). 1985. Вып. XI. С. 23—26.

15. Moffett M. B., Mellen R. H. Effective length of parametric acoustic sources // JASA. 1981. V. 70. N. 5. P. 1424—1426.

Дата принятия 25.02.2015 г.

534.88:532.5

Пассивный метод обнаружения движущихся в воде целей

И. Ф. КАДЫКОВ

Специальное научно-производственное объединение «Элерон»,
Москва, Россия, e-mail: kadykov@ eleron.org

Рассмотрен новый пассивный метод охраны водных рубежей, который заключается в регистрации колебаний давления в поле неоднородной волны давления, возникающей при обтекании движущегося в воде тела. Особенностью волны как зоны локальных давлений является ее резкое ограничение в пространстве рядом с телом, что позволяет четко отслеживать зону изменений давлений.

Ключевые слова: водный рубеж, неоднородная волна давления.

A new solution of passive method of the water line verge protection based on registration of pressure fluctuations in the field of nonuniform wave, occurring at the flow about the moving body is considered. The feature of the wave as of the band of local pressures, is its sharp restriction in the space near the body, making possible to monitor the area pressure changes.

Key words: water line verge, inhomogeneous pressure wave.

Проблема охраны водных рубежей актуальна во всем мире, особенно она значима для водных рубежей атомных электростанций (АЭС). Рубежи АЭС — это внешняя система

водяного охлаждения реакторов, состоящая из прилегающего к станции водного бассейна, а также водоподводящего и водоотводящего каналов, по которым может произойти

несанкционированное проникновение на охраняемую территорию. В настоящее время острота проблемы возрастает из-за увеличения количества АЭС, расположения их в густонаселенных областях и роста террористических угроз. Еще на этапе создания атомных станций необходимо разработать систему обеспечения их охраны со стороны суши и воды, обучить персонал правилам и принципам эксплуатации, что особенно важно для стран третьего мира, не обладающих достаточным уровнем подготовки.

Анализ существующих методов обнаружения движущихся в воде целей. Сложность обнаружения движущихся в воде целей усугубляется тем, что для акваторий и каналов АЭС характерны глубины менее 5 м. В таких мелководных областях традиционные методы активной акустической гидролокации практически не работают из-за многочисленных отражений звука от дна и водной поверхности. Также малоприменимы в этих условиях известные пассивные способы охраны, например, метод обнаружения подводных целей, имеющих собственное акустическое излучение. Недостаток метода заключается в том, что не все цели являются источником излучения, к их числу относится и пловец в ластах. Другой известный пассивный метод обнаружения движущихся целей на мелководье — магнитометрический, основанный на реакции на находящиеся у пловца-нарушителя железосодержащие материалы. Однако в современной экипировке пловца такие материалы предусмотрительно отсутствуют. К тому же метод имеет слабую чувствительность из-за резкого спада сигнала на расстоянии, поэтому его нельзя широко использовать. Известен также «теневой» или «просветный» метод, когда объект обнаруживается при экранировании им звукового луча, падающего от излучателя на приемник. С той же целью источником излучения может служить окружающий естественный шум водной среды, поступающий на донный приемник с поверхности или шум от удаленного судна. Принципиальный недостаток такого метода — сложность создания условий для эффективного выявления объекта из-за влияния дифракционных эффектов и рефракции звука в реальной водной среде, когда картина затенения слабовыраженная даже на сравнительно небольших расстояниях от объекта, особенно на низких частотах, или если источники распределены в пространстве, что не позволяет идентифицировать направление прихода от них звуковых лучей.

Решение проблемы. Эффективное средство решения отмеченных противоречий найдено в компании «Элерон» на основе фундаментальных научных исследований и выбора обоснованного подхода к проведению натурных морских испытаний. Разработаны нетрадиционные решения задач охраны с использованием новых методов и средств. Рассматриваемый ниже пассивный метод обнаружения движущегося под водой пловца (в ластах, на средствах передвижения или автоматически управляемых технических аппаратах) заключается в отслеживании зоны локальных колебаний давления в поле неоднородной волны давления, сопровождающей тело [1]. Так как эта зона резко ограничена в пространстве рядом с телом и движется вместе с ним, регистра-

ция колебаний свидетельствует о получении информации о нахождении объекта. Метод прошел теоретическую и всестороннюю экспериментальную проверку, включая апробацию при практическом использовании и опытной эксплуатации.

При теоретическом рассмотрении процесса обтекания тела, движущегося в водной среде, можно выделить независимые исходные физические параметры: p — давление в поле неоднородной волны давления; ρ — плотность среды; V — скорость движения тела; l , L — линейные параметры волны давления соответственно в поперечном и продольном направлениях; μ — динамическая вязкость среды; r — расстояние от линии движения тела до точки приема локальных колебаний давления; t — текущее время.

Проанализировав размерности выбранных физических параметров, можно составить безразмерные комбинации, позволяющие выявить характер зависимости давления в волне от параметров движения тела и свойств среды, определяющих в совокупности характер процесса образования неоднородной волны давления при движении тела в среде. Эти комбинации имеют вид: $p^2 r / \rho \mu V^3$; Vt/L ; L/l ; $\rho V l / \mu$. Здесь первая безразмерная комбинация раскрывает форму зависимости давления в волне от V и r : $p \sim V^{1.5}$, $r^{-0.5}$. Вторая же безразмерная комбинация, определяемая отношением Vt/L , интерпретируется в рамках принятого подхода как пространственная и временная характеристика регистрируемого давления в волне. Она должна отражать универсальную пространственно-временную периодичность поля давления в виде чередования максимумов и минимумов в зависимости от V , L .

Важным моментом при рассмотрении всей совокупности зарегистрированных опытных данных является отношение L/l , которое можно определить как третью безразмерную комбинацию параметров, характеризующих двумерный характер поля давления, зависящий от размера и формы движущегося тела. При сохранении этого отношения постоянным, например, в опытах, где происходит движение одного и того же тела в водной среде, можно ограничиться неполной комбинацией параметров, т. е. только зависимостями $p(r)$, $p(Vt)$. Четвертая безразмерная комбинация является известным в гидродинамике числом Рейнольдса и может быть исключена из дальнейшего рассмотрения, поскольку её значение определяет лишь характер обтекания тела в среде: ламинарное оно или турбулентное.

При переходе к экспериментальной проверке рассмотренных соотношений и предлагаемого пассивного способа охраны необходимо учитывать, что обеспечение движения тела предполагает применение двигательного аппарата, также воздействующего на водную среду. Это ласты пловца или другие специальные технические средства, предназначенные для повышения скорости, которые вносят свой дополнительный вклад в формирование сигнала помимо воздействия на среду со стороны пловца.

Общую картину формирования поля давления можно представить как динамическое воздействие движущегося объекта на среду в виде образования пониженного давле-

ния (из-за оттока водной среды из области перед пловцом в область за ним), вызванного работой ласт и компенсацией, образующейся при скоростном напоре водной среды перед пловцом. Соответственно, за пловцом приток воды в эту зону приводит к повышенному давлению, которое компенсирует разрежение и создает силу, движущую пловца. На происходящие процессы накладываются высокочастотные колебания давления, обусловленные импульсной работой ласт.

Результаты экспериментальных исследований. Опыты в воде проводили в озере Глубоком под Звенигородом, так как там наблюдается малый уровень естественных помех. Измерительный приемник-гидрофон на кабеле опускали на дно озера на глубину 4 м, а на водную поверхность помещали два разметочных буя по линии пересечения с гидрофоном. Разметка служила ориентировкой для пловца и позволяла оценивать скорость его прохождения под водой от одного буя до другого. Пловец опускался под воду на глубину 2 м у одного из буйев и на этой глубине проплывал над гидрофоном до другого буя. На дисплее компьютера, установленном на вспомогательном плавсредстве, отображались фиксируемые прибором сигналы колебаний давления и одновременно регистрировался фон естественного низкочастотного шума водной среды.

На рис. 1 представлены сигналы, зарегистрированные при двух проходах пловца над приёмником, — с высокой и низкой скоростями. Его максимальная скорость прохождения между разметочными буйами составляла 2,3, минимальная — менее 1 м/с. Из рис. 1 следует, что каждый сигнал состоит из низкочастотной составляющей, представляющей неоднородную волну в виде областей пониженного и повышенного давлений и наложенных на нее высокочастотных колебаний, обусловленных работой ласт. Частотные составляющие неоднородной волны давления находятся в области 0,1—0,2 Гц, а колебания давления, вызванные работой ласт, — в области 2 Гц.

Из приведённых теоретических соотношений следует, что волна давления должна иметь универсальный вид в координатах $p/V^{1,5}$, Vt в широком диапазоне скоростей движения пловца. Такие представления действительно подтверждаются, как это следует из рис. 2, где наблюдаемые регистрируемые в ходе экспериментальной проверки сигналы представлены в указанных безразмерных координатах при разных скоростях движения пловца, различающихся в 4,6 раза.

Заметим, что из представленных на рис. 2 кривых путём частотной фильтрации были специально исключены высокочастотные составляющие, вызванные работой ласт, поскольку они имеют иную физическую природу чем рассматриваемая волна давления. Из представленной на рис. 2 универсальной формы волны давления, сопровождающей пловца, следует, что пространственный размер волны давления и размеры отдельных её областей по линии движения пловца, характеризующиеся универсальной пространственной координатой Ut , можно оценить для использованного диапазона скоростей. Область увеличения давления в зоне за пловцом, чётко проявляющаяся в регистрируемых сигналах, имеет протяженность 4—5 м по линии его движения с рез-

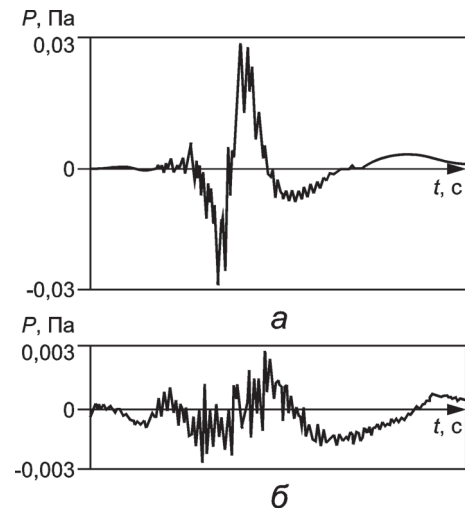


Рис. 1. Примеры сигналов, зарегистрированных приемниками при движении пловца со скоростями 2,3 (а) и менее 1 м/с (б), соответственно

ким спадом по краям. Общая протяжённость волны давления вдоль линии движения, состоящая из областей понижения и повышения давления, а также зоны турбулентности позади пловца, составляет примерно 20 м. При этом для турбулентного следа за пловцом характерно расширение поперечного размера по линии движения [2].

Из рассмотренных оценок можно сделать вывод, что обнаружение пловца при пересечении им цепочки приемников происходит при расстоянии между соседними приборами, не превышающем 4—5 м. Следовательно, метод можно использовать при укладке приемников на дно на глубинах 4—5 м, характерных для прибрежных областей. При применении данного способа в мелководных зонах приём колебаний неоднородной волны давления от движущейся в воде цели осуществляют с помощью цепочки приемников с известными координатами, пространственно-разнесённых и расположенных в зонах ожидаемого появления объекта, которые регистрируют колебания давления. Местоположение обнаруженной цели определяют относительно приёмников при их известном положении на дне, а размер и скорость её движения — по характеристикам регистрируемого сигнала. Эффективность системы охраны определяется технической возможностью фиксировать указанные низкочастотные сигналы в условиях возможных помех. В каждом из приёмников регистрируются колебания давления и происходит необходимая предварительная обработка принятых сигналов для передачи их в линию связи, например фильтрация на фоне естественного шума водной среды, а также усиление и перевод из аналоговой формы в цифровую. Кроме того, предварительная обработка принятых сигналов в приёмниках существенно снижает объём передачи данных по общей линии. Действительно, при большом числе независимых приборов в системе (порядка 100 и более) одновременное поступление сигналов ожидается лишь от одного или нескольких приёмников, что позволяет, используя установленные в них логические схемы, передавать по общей линии

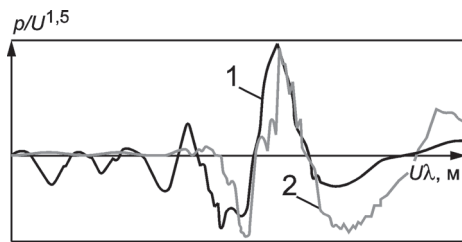


Рис. 2. Универсальная форма представления кривых прохода пловца:

1 — со скоростью 2,3 м/с; 2 — со скоростью менее 1 м/с

сигнал или данные об обнаруженной цели только от ограниченного числа датчиков, зарегистрировавших сигналы. Сигналы из общей линии поступают в электронный комплекс обработки данных, где сигнал от цели, принятый одним или несколькими приемниками в цепочке, выделяется и по нему определяются параметры обнаруженной цели: направление её движения, скорость, размер, место нарушения, число обнаруженных целей. Электронный комплекс обработки данных состоит из соединенных между собой блоков. Особенностью системы является низкочастотный характер регистрируемых колебаний давления. Из рис. 1 следует, что при движении пловца в ластах со скоростью 2 м/с общая длительность прохода области неоднородной волны давления составляет примерно 5 с, что эквивалентно частотам в области 0,2 Гц. При уменьшении скорости пловца длительность сигнала пропорционально увеличивается, а частота уменьшается. Эти оценки определяют требования к частотному диапазону регистрирующей аппаратуры в соответствии со скоростями обнаруженных подводных целей в условиях естественного шума водной среды на мелководье. Помехи, спектр которых имеет резко выраженный подъем в области частот примерно 0,3 Гц, обусловлены волнением водной поверхности, течениями, температурными флуктуациями водной среды, а также сейсмической обстановкой в ряде районов, в которых влияние наиболее заметно при регистрации слабых сигналов от пловцов, движущихся с низкими скоростями [3].

Практическое использование нового метода. Предложенный способ достаточно прост, бюджетен и отличается

более высокими показателями эффективности по сравнению с решениями аналогичных задач по охране рубежей активными средствами, а также по сравнению с малочувствительной и громоздкой магнитометрической системой. В мелководной прибрежной области метод можно реализовать в виде системы охраны с цепочкой проложенных по дну приемников колебаний давления. Система предназначена для пассивного контроля некоторого достаточно протяженного водного рубежа и может быть использована для охраны подводных, надводных и береговых сооружений со стороны мелководной среды, т. е. везде, где активная гидролокация малоэффективна.

При осуществлении рассмотренного нового пассивного метода обнаружения движущихся подводных целей, таких как пловцы в ластах, необходимо быть готовыми к возникновению специфических трудностей, связанных, например, с изготовлением приёмников низкочастотных колебаний давления с частотным диапазоном от десятых и сотых долей герца до единиц герц. На столь низких частотах помимо рассмотренного влияния волнения на приёмник возможно воздействие флуктуаций температуры водной среды, течений и сейсмических колебаний. Меры по компенсации влияния такого рода помех рассмотрены в [4].

Л и т е р а т у р а

1. Пат. 2488844 РФ. Пассивный метод и система обнаружения движущихся в воде объектов / И. Ф. Кадыков // Изобретения. Полезные модели. 2010. Бюл. № 15.
2. Кутателадзе С. С. Пристенная турбулентность. Новосибирск: Наука, 1973.
3. Кадыков И. Ф. Подводный низкочастотный акустический шум океана. М.: Эдиториал УРСС, 1999.
4. Пат. 2498251 РФ. Приемник низкочастотных колебаний давления в водной среде / И. Ф. Кадыков // Изобретения. Полезные модели. 2010. Бюл. № 7.

Дата принятия 05.06.2015 г.