

УДК 623.3

© Щербаков Г.Н., Шлыков Ю.А., Николаев А.В., Панов Д.В., Мухин С.В.
Shcherbakov G., Shlykov Y., Nikolaev A., Panov D., Mukhin S.

РАДИОВОЛНОВЫЙ МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДВОДНЫХ НАРУШИТЕЛЕЙ В ПРЕСНОЙ ВОДЕ

RADIO-UNDULAR METHOD OF DETECTION OF SUBMERGED INFRINGERS IN SWEET WATER

Аннотация. Анализ существующих методов обнаружения подводных нарушителей показывает, что они оказываются малоэффективными при работе вблизи мощных промышленных и гидроакустических источников помех. Данные источники помех характерны для всех береговых критически важных объектов: закрытых административно-территориальных образований и особенно гидроэлектростанций, гидротехнических сооружений, портов и т.п. Существующие же угрозы диверсионно-террористических атак в отношении подобных объектов требуют разработок новых методов обнаружения, эффективно функционирующих в условиях помех. Авторами данной работы решение проблемы видится за счёт использования линейного и нелинейного радиоволнового метода локализации водной среды.

Annotation. The analysis of existing methods of detection of subsea troublemakers shows that they appeared to be ineffective if working close to high-power industrial and hydroacoustic interference sources. These interference sources are typical for all offshore critically important objects: closed administrative and territorial formations, especially hydroelectric power plant, hydroengineering structures, ports etc. Existing risks of subversive-terrorist attacks towards the above objects are demanded the development of the new detection methods, effectively functioning under interference sources' conditions. The Authors of this Article see the settlement of this problem in using the radio wave method of aqueous medium location.

Ключевые слова. Электромагнитное поле, передающее устройство, нарушитель водного пространства, комплексный коэффициент рассеяния, удельные потери, приёмная антенна, контролируемая зона.

Key words. Electromagnetic field, transmission device, the infringer of aqueous room, a complex dispersion coefficient, specific loss, the receiving aerial, controlled area.

Существующая угроза террористических атак для важных объектов военного и административного управления со стороны акваторий требует принятия различных организационных и технических решений. К сожалению, существующие решения по охране критически важных объектов, находящихся вблизи береговой зоны, в основном направлены для решения задач по поиску, обнаружению и уничтожению надводных и воздушных объектов.

Скудность арсенала технических средств по контролю подводного пространства, особенно в прибрежной зоне, обуславливает необходимость в создании средств охраны водных районов. В настоящее время наибольшее распространение получили в основном магнитометрические и гидроакустические средства обнаружения подводных нарушителей. К ним можно отнести системы обнаружения водолазов типа «ПАЛАДА» (Россия) и

Щербаков Григорий Николаевич – доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник Военного института Инженерных войск ВУНЦ МО РФ; тел: +7(495) 211-57-99;

Шлыков Юрий Александрович – кандидат технических наук, сотрудник ОАО «РусГидро»;

Николаев Алексей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, докторант Военного института Инженерных войск ВУНЦ МО РФ;

Панов Дмитрий Вячеславович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры радиолокационного вооружения Военной академии ПВО СВ;

Мухин Сергей Александрович – адъюнкт Военного института Инженерных войск ВУНЦ МО РФ.

Scherbakov Grigory – doctor of technical sciences, professor, senior researcher of the Military institute Corps of engineers VUNTS Defense ministry, tel: +7 (495) 211-57-99;

Shlykov Yuri – candidate of technical sciences, a member of «RusHydro»;

Nikolaev Alexey – candidate of technical sciences, associate professor, Ph.D. Military institute Corps of engineers VUNTS Defense ministry;

Panov Dmitriy – candidate of technical sciences, senior lecturer in radar air defense weapons Military academy of Army air defense;

Mukhin Sergey – adjunct Military institute Corps of engineers VUNTS Defense ministry.

«DDS» (Diver Detection Sonar system, производства Израиль), а также комплекты технических средств наблюдения за подводной обстановкой типа «ГАРПУН» (Россия) представляют собой различные рубежные и позиционные системы обнаружения. Функциональными элементами их являются в основном магнитометрические и гидроакустические средства обнаружения.

Анализ научно-технической и патентной литературы, а также информации, представленной средствами массовой информации и на сайтах ведущих зарубежных и отечественных производителей систем и комплексов инженерно-технических средств охраны береговых объектов, показывает, что обнаружение подводных нарушителей может осуществляться с использованием методов активной и пассивной локации, а также их комбинации. В первом случае в состав средства обнаружения входит источник зондирующего поля (большие генераторные, гидроакустические антенны, намагничивающие рамочные антенны и т.п.), во втором – он отсутствует, так как используются собственные физические поля (гидроакустические, электромагнитные и т.п.) или аномалии геомагнитного поля Земли, обусловленные наличием в снаряжении подводного нарушителя ферромагнитных элементов (нож, оружие, взрывное устройство, подводные средства доставки и т.п.).

Дальность действия технических средств обнаружения отдельных подводных нарушителей, основанных на разных методах, может быть различной. Например, для магнитометрических и квазистационарных электромагнитных средств она составляет, как правило, единицы метров [1]. Для гидроакустических средств она достигает десятков – сотен метров. Однако функционирование данных средств вблизи берега, особенно на мелководье, сильно подвержено различным помехам (шум прибора, различные отражения от неоднородностей, реверберация) [2]. Кроме того, вблизи гидроэлектростанций, портов и других гидротехнических сооружений, в том числе и строящихся, наличие турбулентных и кавитационных потоков воды с резкими перепадами температур делает их не применимыми для решения задач по обнаружению подводных нарушителей непосредственно вблизи объекта. Функционирование магнитометрических и индукционных средств в условиях мощных электромагнитных помех, создаваемых объектами, и наличия огромных железобетонных конструкций малоэффективно и в некоторых случаях даже невозможно. Поэтому все существующие средства наблюдения за подводным пространством используются в основном для заблаговременного обнаружения нарушителей на дальних к объекту подступах.

Неконтролируемой остаётся зона вблизи объекта это в свою очередь обуславливает актуальность предлагаемых авторами методов, один из которых будет рассмотрен ниже.

Предлагаемый радиоволновый метод обнаружения нарушителя водного пространства функционирует только в пресной воде. Для морской воды данный метод не применим из-за больших потерь, обусловленных сильной ионной проводимостью. Так, в работе [3] показано, что для частоты первичного электромагнитного поля f МГц коэффициент поглощения $\gamma = 330$ дБ/м, а глубина проникновения составляет всего $l = 6$ мм. В то же время для пресной воды её значение – 0,18 дБ/м и 24 м соответственно. В целом по свойствам пресная вода близка к песчаному грунту, где $\gamma = 0,14$ дБ/м, а глубина проникновения электромагнитной волны – 31 м, хотя и имеет другие электрофизические параметры. В свою очередь данное обстоятельство связано с тем, что электромагнитное поле в пресной воде сильнее сжимается из-за более низкой фазовой скорости распространения электромагнитной волны. Так, для сухого песчаного грунта она составляет около 17 см/нс, а пресной воды – около 3,3 см/нс. Применительно к задаче контроля водного пространства на мелководье, вблизи гидроэлектростанций, порта и других гидротехнических сооружений этой глубины достаточно, так как она же и будет определять дальность обнаружения радиоволнового метода. В первом приближении, считая состав контролируемого водного участка однородным, оценить дальность обнаружения электромагнитного метода локации можно через глубину проникновения электромагнитного поля, а именно [1, 3, 4]:

$$l = \frac{\lambda_0}{2\pi\sqrt{\varepsilon'}\operatorname{tg}\Delta}; \quad (1)$$

$$\operatorname{tg}\Delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\sigma}{\omega_0\varepsilon_0\varepsilon'}, \quad (2)$$

а коэффициент поглощения с помощью выражения [3]

$$\gamma [1/\text{м}] = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{-\varepsilon' + \sqrt{(\varepsilon')^2 + (\varepsilon'')^2}}{2}}, \quad (3)$$

где λ_0 , ω_0 – длина волны и частота первичного электромагнитного поля в свободном пространстве;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость в воздухе ($10^{-9}/36\pi$ Ф/м)

ε' , ε'' – действительная и комплексная части относительной диэлектрической проницаемости, определяемые полуэмпирическими формулами Дебая [3];

$\operatorname{tg}\Delta$ – тангенс угла потерь;

σ – удельная проводимость среды.

Сущность радиоволнового метода обнаружения

подводного нарушителя заключается в регистрации рассеянного им электромагнитного поля. Физика процесса рассеяния заключается в отличиях диэлектрической проницаемости между пресной водой и физическими тканями, кровью человека. В этом случае комплексный коэффициент отражения электромагнитной волны от подводного нарушителя без учёта поляризации может быть оценен выражением:

$$\begin{aligned} \dot{k} &= |\dot{k}| e^{-j\Phi} = \sqrt{\frac{S_{\text{эфф.плн}}}{4\pi\lambda_{\text{ср}}^2}} e^{-j\Phi} = \\ &= \sqrt{\frac{S_{\text{эфф.плн}}}{4\pi(\lambda_0/\text{Re}(\epsilon'))^2}} e^{-j\Phi}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $S_{\text{эфф.плн}}$ – эффективная поверхность рассеяния подводного нарушителя, м²;

$\lambda_{\text{ср}}$ – длина волны в водной среде, м;

Φ – фаза рассеянного подводным нарушителем электромагнитного поля, рад.

Выбор длины волны первичного электромагнитного поля для предлагаемого линейного метода локации заключается в определении частоты, на которой наблюдается резонансное рассеивание данного поля на физическом объекте. Теоретически в зависимости от соотношения длины волны и размеров объекта поиска, представляя его в виде электрического диполя сферической формы, рассматривают три области линейного рассеяния (рис. 1)

$$\lambda_{\text{ср}}/R_{\text{сф}} \ll 1 \text{ – квазиоптическая область рассеяния; } (5)$$

$$R_{\text{сф}}/\lambda_{\text{ср}} \ll 1 \text{ – релейевская область рассеяния; } (6)$$

$$R_{\text{сф}}/\lambda_{\text{ср}} \approx 1 \text{ – резонансная область, } (7)$$

где $R_{\text{сф}}$ – радиус сферы, м [4].

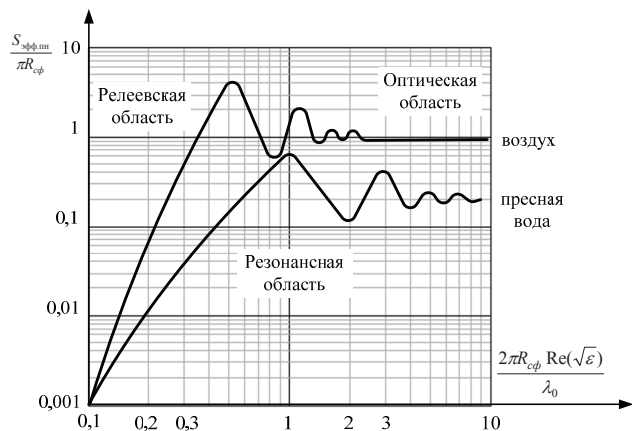


Рис. 1. Эффективная поверхность рассеяния металлической сферы в воздухе и пресной воде (теория)

В нашем случае считается, что размер объекта поиска сравним с длиной волны $\lambda_{\text{ср}}$ первичного электро-

магнитного поля в пресной воде. Оценочные расчёты показывают, что диапазон рабочих частот для реализации предлагаемого метода должен находиться в диапазоне очень высоких частот ($\Delta f = 10 \dots 100$ МГц), при этом потери будут не более 10 дБ/м. Они во многом будут определяться степенью чистоты воды, а также содержанием воздуха, обусловленного турбулентными потоками воды. Последнее характерно для водного пространства вблизи ГЭС, где находятся наиболее уязвимые элементы объекта, а именно дамбы, затворы, водоподъемники [5]. Принцип функционирования данного метода представлен на рис. 2. Фактически данный метод является частным случаем широко известного радиолокационного метода, представленного в работе [4]. Основное отличие заключается в том, что в радиоволновом методе расстояние до объекта поиска соизмеримо с длиной волны первичного электромагнитного поля [1]. Кроме того, выбор средней частоты для известного метода определялся необходимой глубиной зондирования.

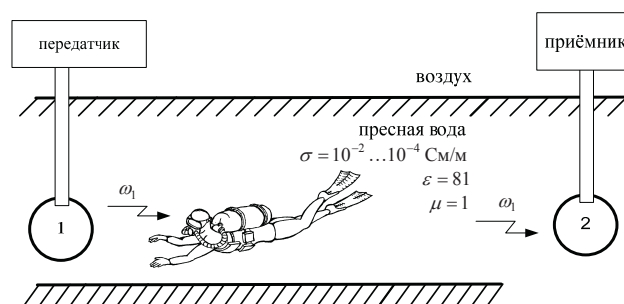


Рис. 2. Принцип функционирования линейного радиоволнового метода обнаружения подводного нарушителя
1, 2 – подводные излучающая и приёмная антенны

Так как процесс обнаружения подводного нарушителя для предлагаемого метода локации осуществляется на малых расстояниях, т.е. в ближней или промежуточной зоне излучающей антенны, то целесообразно использовать антенны магнитного типа. Выбор данного типа антенны обусловлен, как известно, тем, что в электропроводной среде у которой $\epsilon \gg 1$, а $\mu \approx 1$ плотность энергии магнитной составляющей электромагнитного поля вблизи излучающего диполя электрического и особенно магнитного типа намного больше плотности энергии электрической составляющей.

Оценка максимальной дальности действия радиоволнового метода может быть оценена уравнением, описывающим основной закон передачи энергии. Применительно к задаче обнаружения подводного нарушителя он имеет вид

$$\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{а}}} = \frac{G_{\text{а}} A_{\text{пр}} F_{\text{ср}}}{4\pi r^2}, \quad (8)$$

где P_a – мощность излучающей антенны, Вт;

G_a – коэффициент направленного действия передающей антенны;

$P_{пр}$ – принимаемая мощность сигнала приёмной антенной, Вт;

$A_{пр} = 3\lambda_{cp}^2 / 8\pi$ – эффективный раскрыт приёмной антенны, м²;

r – расстояние между антеннами, м;

$F_{cp} = 10^{-0.1\gamma(f)\Delta}$ – множитель ослабления сигнала в воде по мощности;

Δ – база системы, т.е. расстояние между излучающей и приёмной антеннами, м;

f_0 – частота зондирующего поля в свободном пространстве, Гц.

Отсюда максимальная дальность обнаружения для данного метода локации может быть оценена выражением

$$r_{\max} = \sqrt{\frac{P_a A_a A_{пр}}{\lambda_{cp}^2 P_{пр.мин}} 10^{-0.1\gamma(f_0)\Delta}}, \text{ м}^2 \quad (9)$$

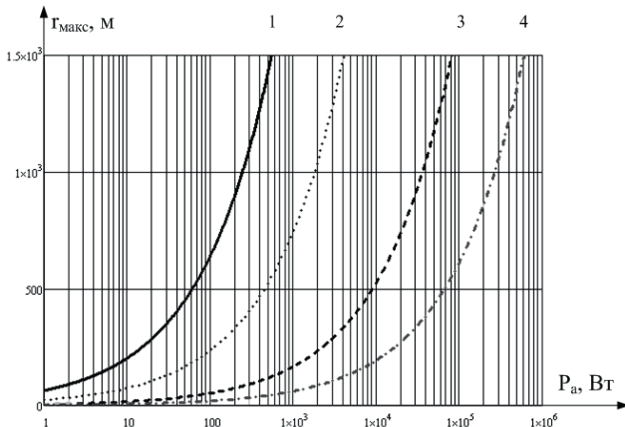


Рис. 3. Теоретическая оценка дальности действия радиоволнового метода обнаружения подводного нарушителя в пресной воде в зависимости от мощности излучаемой энергии и удельной проводимости среды для различных частот первичного электромагнитного поля:

- 1 – $\varepsilon = 80$, $\sigma = 10^{-3}$, $f_0 = 30$ МГц, $P_{пр.мин} = 10^{-16}$ Вт;
- 2 – $\varepsilon = 83$, $\sigma = 10^{-2}$, $f_0 = 30$ МГц, $P_{пр.мин} = 10^{-16}$ Вт;
- 3 – $\varepsilon = 80$, $\sigma = 10^{-3}$, $f_0 = 50$ МГц, $P_{пр.мин} = 10^{-16}$ Вт;
- 4 – $\varepsilon = 83$, $\sigma = 10^{-2}$, $f_0 = 50$ МГц, $P_{пр.мин} = 10^{-16}$ Вт

На рис. 3 представлены зависимости, характеризующие влияние отдельных параметров пресной воды и частоты первичного электромагнитного поля на дальность обнаружения подводных объектов. Анализ рис.3 показывает, что, как и в классической теории радиосвязи, дальность зависит от параметров передающего устройства, длины волны первичного электромагнитного поля и, кроме того, в нашем случае декремента затухания электромагнитной волны для водной среды. Как известно, пределы изменения электрофизических параметров водной среды имеют достаточный разброс.

К примеру, действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости и удельная проводимость во многом зависят от чистоты воды, содержания различных примесей, температуры и т.п. и лежат в диапазонах $\varepsilon' = 80..88$, $\sigma = 10^{-4}..10^{-2}$ См/м. Для данного метода обнаружения увеличение этих параметров приводит к существенному снижению дальности обнаружения. Поэтому дальность обнаружения для предлагаемого метода во многом будет определяться и электрофизическими параметрами водной среды.

С целью проверки гипотезы о возможности использования метода для локации подводных нарушителей был разработан измерительный комплекс (рис.4), включающий в себя:

- передающий тракт:
 - генератор сигналов высокочастотный Г4-119А;
 - антенна магнитного типа;
- приёмный тракт:
 - селективный микровольтметр SMV-8.5;
 - антенна магнитного типа.

В качестве физической модели нарушителя использовался пластмассовый сосуд длиной 0,9 м, наполненный солевым раствором концентрацией 30 г/литр, что соответствует электрофизическим параметрам крови человека (рис.5), а в качестве помехи имитирующий топлек – пустой сосуд. Лабораторные исследования проводились на бассейне научно-технического центра ЗОНД – Р с 1 по 19 сентября 2009 г., средняя температура воздуха 18 С°, влажность воздуха не более 59%. Вода – пресная, средняя температура 16 С°.



Рис. 4. Лабораторный измерительный комплекс для исследования радиоволнового метода обнаружения подводного нарушителя в пресной воде

Суть эксперимента заключалась в регистрации изменений входного сигнала, наведённого на приемной антенне, селективным микровольтметром при пересечении контролируемой зоны имитаторами нарушителя или помехи, а также в определении размеров зоны. Измерение входного сигнала производилось в контрольных точках бассейна.

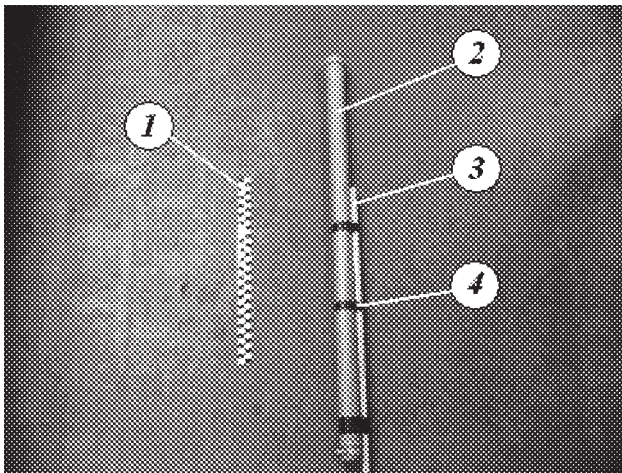


Рис. 5. Физическая модель подводного нарушителя и имитатора помехи: 1 – измерительная линейка (деление – 1 см); 2 – пластмассовая труба с заглушками (пустотелая или наполненная солевым раствором); 3 – стеклопластиковая удерживающая штанга; 4 – диэлектрический соединитель штанги с моделью

Методика измерений

Приемная и передающая рамочные антенны располагались на противоположных стенках бассейна. Оптические оси антенн направлены параллельно дну, их нормали \vec{n} расположены на одной оси. Антенны располагаются друг против друга на расстоянии 2 м, они погружены в воду на глубину 0,8 м. Выбор данной глубины обусловлен отсутствием боковых электромагнитных волн на поверхности бассейна, которые могут оказывать помеховое воздействие на измерительную аппаратуру. Передающая антенна была подключена к генератору высокочастотных сигналов Г4-119А, настроенному на частоту $f_0=30$ МГц. Выходная мощность генератора составляла небольшую величину – 0,7 Вт. Приемная антенна подключалась к селективному микровольтметру SMW-8,5, настроенному на основную частоту зондирующего сигнала, т.е. f_0 . Режим работы SMV-8,5 «AV I» – измерение среднего значения сигнала. Полоса пропускания – 20 кГц. Антенны располагаются таким образом, чтобы между ними установилась минимальная связь, которая фиксировалась селективным микровольтметром – $U_0=1,8$ мкВ (предел чувствительности по приёму для SMW-8,5).

Вначале имитатор нарушителя перемещали вдоль совмещённых оптических осей антенн с шагом 0,2 м. Из-

менение сигнала на выходе приёмной антенны регистрировалось селективным микровольтметром. Далее аналогичным образом перемещали имитатор помехи. В каждой точке производилось 20 выборочных измерений. Данное количество является достаточным для получения достоверной вероятности, равной $\beta = 0,95$. Объём независимых измерений (выборки) определялся, в нашем случае для нормального распределения мгновенных значений параметров электромагнитного поля, выражением [6, 7]

$$n = \left(\frac{k_\beta \sigma}{\Delta} \right)^2, \quad (10)$$

где k_β – уровень доверия, для $\beta=0,95$ составляет $k_\beta=1,96$; σ – среднеквадратическое отклонение измеренного сигнала, обусловленное неточностью установки физических моделей при каждом отдельном измерении (принимается 0,5 мкВ);

Δ – точность оценки измеренных значений (положим $\Delta = 0,25$ мкВ).

Среднее же значение измеренного значения изменения сигнала рассчитывалось по формуле

$$\Delta \bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |U_i - U_0| = \left(\frac{\Delta}{k_\beta \sigma} \right)^2 \sum_{i=1}^n |U_i - U_0|, \quad (11)$$

где U_i – измеренное значение сигнала, мкВ.

Результаты измерений графически представлены на рис. 6. Анализ их позволяет заключить, что при проникновении на контролируемый пресноводный участок (бассейн) физической модели нарушителя относительное изменение входного сигнала для приёмного устройства значительно выше, чем при проникновении имитатора помехи. Данное обстоятельство позволяет установить порог обнаружения нарушителя для предлагаемого метода локации, в нашем конкретном случае он составлял $\Delta U^* = 1,7$ мкВ. Практическая реализация предлагаемого метода возможна, если использовать известные критерии обнаружения (Неймана-Пирсона, минимума среднеквадратической ошибки, максимума апостериорной плотности вероятности и т.п.) или же простые пороговые схемы на компараторах. С физической точки зрения различия в относительном приращении сигнала обусловлено различием комплексного коэффициента отражения для различных типов объектов.

Вторая часть эксперимента заключалась в определении области обнаружения подводного нарушителя в контрольных точках бассейна без фиксации уровня сигнала, наведённого на приёмной антенне. Результаты эксперимента позволили заключить, что данный метод позволяет обнаруживать нарушителя водного пространства

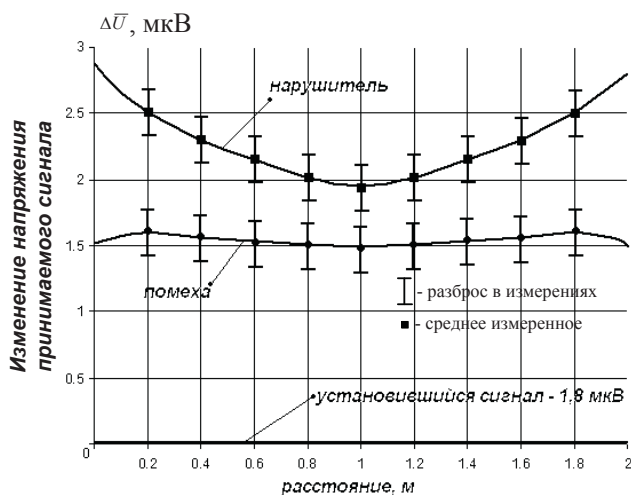


Рис. 6. Экспериментальные зависимости изменения уровня откликов от физических моделей в пресноводном бассейне при исследовании радиоволнового метода локации

в пределах всего объема бассейна. Было обнаружено, что в углах и по центру стенок бассейна при нахождении в этих областях физической модели нарушителя изменений в уровне сигнала не наблюдалось. В то же время при увеличении длины волны электромагнитного поля их размеры увеличивались. С физической точки зрения, по-видимому, это было обусловлено компенсацией зондирующих сигналов и сложной интерференцией электромагнитных волн, обусловленной многократными отражениями от стенок бассейна. Увеличение мощности сигнала на выходе излучающей антенны в ходе эксперимента на размеры зоны не влияли.

Таким образом, предлагаемый метод электромагнитной локации водной среды, позволяет обнаруживать

подводные объекты в пределах зоны обнаружения. Практическая реализация данного метода возможна при разработке устройств, обеспечивающих вскрытие действий подводных диверсантов-террористов на ближних подступах к охраняемой зоне критически важного объекта. Процессы, происходящие при распространении электромагнитной волны в водной среде, в настоящее время мало изучены, а теоретический анализ их весьма сложен. Поэтому теоретические расчёты и выводы данной статьи носят оценочный характер в условиях определенных ограничений. Результаты экспериментальных исследований, проведенных авторами, подтверждают работоспособность данного метода в пресной воде. Отметим, что малые дальности обнаружения в эксперименте обусловлены малой мощностью высокочастотного генератора и малыми размерами измерительного бассейна. Ранее были получены зависимости предельной дальности обнаружения радиоволнового метода от чувствительности (по полю) приёмного устройства, электрофизических параметров водной среды и мощности, подводимой к антенне для передающего тракта. Они показали, что при реально достижимой чувствительности $P_{пр.мин} = 10^{-16}$ Вт и мощности передающего устройства 1 кВт дальность лежит ориентировочно в пределах от сотен метров до нескольких километров. Этой дальности обнаружения достаточно для решения задач по контролю подводного пространства вблизи критически важного объекта. Одним из возможных направлений увеличения дальности обнаружения предлагаемого метода локации является создание направленных подводных излучающих и приёмных магнитных антенн.

Литература:

1. Щербачков Г.Н. Обнаружение объектов в укрывающих средах. – М.: «Арбат-иформ», 1998. – 144 с.
2. Шлыков Ю.А. Проблемные вопросы защиты гидроэлектростанций от диверсионно-террористических угроз. Специальная техника, №5, 2007.
3. Яковлев О.И., Якубов В.П. и др. Распространение радиоволн. Учебник/Под редакцией Яковлева О.И. – М.: URSS. 2009 – 496 с.
4. Изюмов С.В., Дручинин С.В., Вознесенский А.С. Теория и методы георадиолокации. – М.: изд. «Гор-ная книга». 2008.
5. Шлыков Ю.А., Щербачков Г.Н. Методы и средства противодействия «взрывному» терроризму при ох-ране ГЭС. – М.: изд. «Эльф ИПР», 2008 г.
6. Абезгауз Г.Г., Тронь А.П. и др. Справочник по вероятностным расчётам. Изд. второе, дополненное и исправленное. – М.: Воениздат, 1970. 536 с.
7. Стиридонов В.П., Лопаткин А.А. Математическая обработка физико-химических данных. – М.: изд. Московского университета, 1970. 22 с.

Материал поступил в редакцию 20. 12. 2010 г.