

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ziemer R. E., Peterson R. L. Introduction to spread spectrum communications. New Jersey: Prentice Hall, 1995. 689 p.
2. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / под ред. В. И. Борисова. М.: Радио и связь, 2003. 640 с.
3. Персли М. Б. Расширение спектра сигналов в пакетных радиосетях // ТИИЭР. 1987. Т. 75, № 1. С. 140–162.
4. Нахмансон Г. С., Козлов С. В. Обнаружение фазоманипулированного широкополосного сигнала с квадратурной фазовой модуляцией в условиях взаимных помех и внутренних шумов аппаратуры // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2014. Вып. 2. С. 21–29.
5. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М.: Сов. радио, 1966. 678 с.
6. Миддлтон Д. Введение в статистическую теорию связи: в 2 т. М.: Сов. радио, 1961. Т. 1. 781 с.
7. Нахмансон Г. С., Стародубцева Е. А. Вероятность ошибки оценивания информационного символа в системах радиосвязи с фазоманипулированными широкополосными сигналами в условиях взаимных помех // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58, № 2. С. 154–162.

G. S. Nakhmanson

Air force academy n. a. prof. N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin (Voronezh)

S. V. Kozlov

Voronezh state university

Receiving of direct-sequence spread spectrum signal with quadrature phase-shift keying in case of multiple access interference and internal Gaussian noise

Receiving of the broadband phase modulated signal with quadrature phase-shift keying in case of multiple access interference and internal Gaussian noise has been considered. Bit error rate of broadband phase modulated signal with quadrature phase-shift keying has been obtained in case amplitudes of receiving signal and interferences have both regular and fluctuating components. Broadband phase modulated signal bit error rate as a function of signal-to-noise ratio, signal-to-interference ratio, number of interferences and false positive probability has been analyzed.

Phase manipulated broadband signal, mutual interference, quadrature phase modulation, pseudorandom sequences, average error probability

Статья поступила в редакцию 11 февраля 2015 г.

УДК 528.854:681.883.6

В. С. Давыдов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Повышение помехозащищенности идентификации и распознавания гидролокационных сигналов от тел сложной формы на фоне реверберационных помех

Разработаны и проверены в гидроакустическом бассейне и в морских условиях методы идентификации и распознавания гидролокационных сигналов, отраженных от тел сложной геометрической формы. Показана их большая помехозащищенность по сравнению с известными методами распознавания. Приведено сравнение этих методов с методом обращения волнового фронта. Результаты моделирования позволяют объяснить известный факт применения дельфинами многоимпульсных зондирующих посылок с неравными расстояниями между импульсами.

Гидролокационные сигналы, идентификация, распознавание, реверберация, классификационные признаки

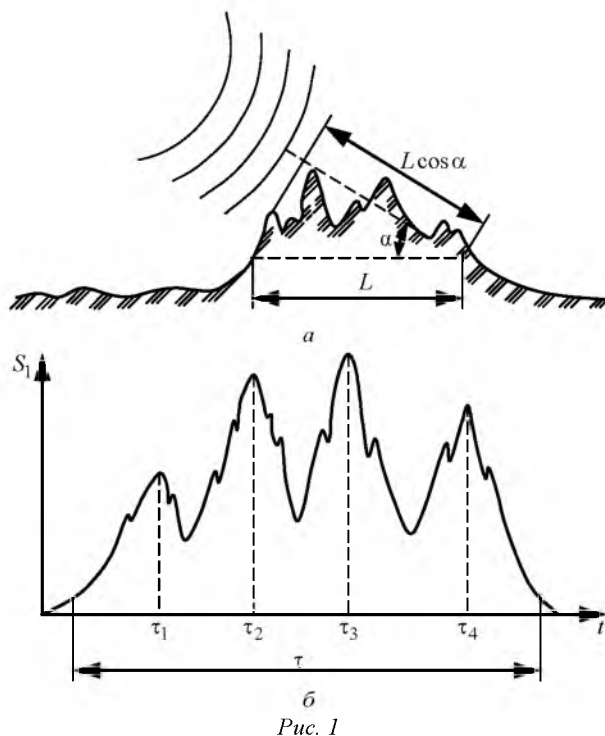
Многоальтернативное распознавание и идентификация гидролокационных сигналов и полей тел сложной геометрической формы, состоящих

из отдельных конструктивных элементов, размеры которых значительно превышают длины облучающих их волн, исследовались применительно к

использованию зондирующих импульсов с высоким разрешением по дальности расположения отдельных отражающих элементов (короткие зондирующие импульсы, пространственная длина которых значительно меньше длин распознаваемых целей, или длинные сложные зондирующие импульсы с последующим сжатием их в согласованном фильтре или с помощью взаимно корреляционной обработки гидролокационных сигналов с копией зондирующей посылки) [1]. В ряде биологических исследований доказано применение для распознавания подводных объектов коротких зондирующих импульсов морскими животными, в частности, дельфинами [2].

Построить подробное звуковое изображение объектов возможно только на чрезвычайно малых дальностях из-за ограниченных размеров гидроакустических антенн. Углы прихода отраженных от реальных объектов сигналов на дальностях их обнаружения измерялись с погрешностью $\Delta\alpha, \Delta\beta = 10...15^\circ$ в вертикальной и в горизонтальной плоскостях соответственно. Поэтому распознавание и идентификация выполнялись в диапазонах углов, определяемых конкретной задачей, с угловым разрешением $\Delta\alpha, \Delta\beta = 10...15^\circ$.

При облучении тела сложной формы (ТСФ) под углом α (рис. 1, а) формируется гидролокационный сигнал длительностью $\tau = 2L \cos \alpha / c$ (c – скорость звука в воде). В результате отражения от отражающих элементов в огибающей S_1 этого



сигнала в позициях $\tau_j, j = \overline{1, 4}$ (рис. 1, б) формируются существенные максимумы. В результате проведенных исследований автором настоящей статьи доказано, что при указанном угловом разрешении наиболее устойчивым к изменению углов и информативным является признаковое пространство временных положений указанных максимумов, полученных при использовании зондирующих импульсов с высоким разрешением по дальности расположения.

Амплитудные значения существенных максимумов в гидролокационных сигналах претерпевали значительные изменения, еще бóльшим изменениям подвержены сами гидролокационные сигналы с учетом высокочастотного заполнения.

В результате проведенных исследований, основанных на статистической теории распознавания образов, теории информации и математической статистики, а также теории ранговых критериев, разработаны:

- алгоритмы выделения признаков и многомерных признаков пространств в огибающей гидролокационного сигнала (или в огибающей взаимно корреляционной функции (ВКФ) сложного гидролокационного сигнала с копией зондирующего импульса) [3];

- правило построения эталонов многомерных признаков пространств, имеющих произвольные функции распределения [1], [4];

- оптимальное решающее правило многоальтернативного распознавания образов ТСФ на основе многомерных признаков пространств с переменной размерностью [1], [5], [6];

- правила идентификации ТСФ при одном известном эталоне признаков пространств с переменной размерностью [1];

- методы распознавания и идентификации ТСФ по гидролокационным сигналам [1];

- метод излучения эталонных сигналов для идентификации ТСФ на дальностях, близких к дальностям их обнаружения, в условиях многолучевого распространения эхосигналов в морской среде [6];

- метод переизлучения отраженных сигналов и метод междуцикловой корреляционной обработки сигналов для распознавания неподвижных и малоподвижных (со скоростью менее трех узлов) ТСФ на фоне случайных реверберационных помех [1], [7].

Метод излучения эталонных сигналов. При использовании зондирующих импульсов с высоким разрешением по дальности расположения отражающих элементов уровень отраженного сигнала $S(t)$ несколько меньше, чем при использо-

вании длинной зондирующей посылки, перекрывающей все распознаваемое тело. Для реальных объектов эта разность составляет 8...12 дБ. Распознавание ТСФ в морских условиях затруднено при многолучевом распространении сигналов в морской среде в результате сложения сигналов, приходящих с разных направлений на гидроакустическую антенну и вызывающих таким образом искажение признакового пространства временных положений существенных максимумов в огибающих гидролокационных сигналах.

Поэтому предложен новый принцип формирования гидролокационных сигналов и разработан метод излучения эталонных сигналов, состоящий во введении в зондирующий сигнал ожидаемых задержек откликов от отражающих элементов обнаруживаемого ТСФ $\{\tau_j\}$. Указанная информация предварительно собирается и усредняется на этапе обучения при облучении распознаваемого ТСФ зондирующим импульсом с высоким разрешением по дальности отражающих элементов.

Для повышения помехозащищенности идентификации ТСФ от воздействия мощных шумовых и реверберационных помех предложено формировать эталонный зондирующий сигнал в виде совокупности коротких импульсов $\xi_k(t)$ или длинных сложных зондирующих импульсов $\xi_{сд}(t)$. Взаимные задержки между импульсами в последовательности соответствуют расположенным в обратном порядке эталонным значениям взаимных положений максимумов $\{\tau_i\}$ в эхосигналах от распознаваемого тела для определенного диапазона углов облучения [3]. Эталонные значения для каждого максимума определяются как средние значения для всех τ_i , выявленных в процессе обучения в эхосигналах для j -й области в диапазоне углов $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$. Описанный метод при использовании коротких зондирующих импульсов иллюстрируется рис. 2, где $S_1(t)$ – огибающая отраженного сигнала от ТСФ; $S_2(t)$ – огибающая излучаемого зондирующего сигнала в виде совокупности коротких импульсов равных амплитуд с задержками $\{\tau_v\}$ между ними; $S_3(t)$, $S_4(t)$ и $S_5(t)$ – огибающие сигналов, отраженных от трех элементов тела (показаны схематично с учетом лишь зеркальных составляющих); $S_\Sigma(t)$ – огибающая суммарного отраженного сигнала от всего тела.

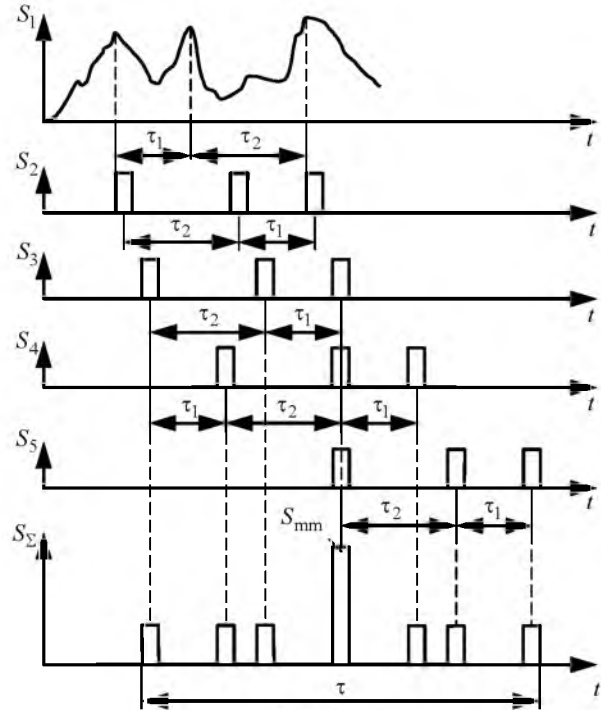


Рис. 2

Представив переходную функцию ТСФ в виде набора дельта-импульсов с задержками $\{\tau_j\}$ и амплитудами $\{a_j\}$:

$$\varphi(t) = \sum_{j=1}^n a_j \delta(t - \tau_j),$$

эхосигнал можно определить в виде свертки:

$$\begin{aligned} S_\Sigma(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} S_2(t) \varphi(t - \tau) d\tau = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} S_2(t) \sum_{j=1}^n a_j \delta(t - \tau_j - \tau) d\tau = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{v=1}^n a_v \xi(t) \varphi(t + \tau_v) \sum_{j=1}^n a_j \delta(t - \tau_j - \tau) d\tau = \\ &= \sum_{v=1}^n \sum_{j=1}^n a_v a_j \xi(t + \tau_v - \tau_j). \end{aligned}$$

При поэлементном совпадении $\{\tau_j\}$ и $\{\tau_v\}$ В $S_\Sigma(t)$ наблюдается глобальный максимум S_{mm} , равный сумме отраженных сигналов от всех элементов тела, превышающий средний уровень огибающей $\bar{S}_\Sigma(t)$ [3]. Если же $S_2(t)$ формируется в виде совокупности длинных сложных зондирующих импульсов $\xi_{сд}(t)$, импульсный максимум S_{mm} формируется в результате согласованной фильтрации и детектирования $\bar{S}_\Sigma(t)$.

Распознавание ТСФ фиксируется при превышении отношением $D_\Sigma = S_{\text{mm}}/\overline{S_\Sigma}$ порогового уровня ψ . Порог ψ устанавливается на основе известных условных плотностей вероятностей величин D_Σ для распознаваемого тела $P(D_\Sigma|\gamma_k)$ и реверберационных помех $P(D_\Sigma|\gamma_m)$, априорных вероятностей появления S_{mm} для распознаваемых ТСФ $P(\gamma_k)$ и помех $P(\gamma_m)$, функций потерь Π_{mk} при принятии решения о присутствии распознаваемого тела ($k=1$) или его отсутствии ($k=0$), если в действительности наблюдается ($m=0$) или отсутствует ($m=1$) реверберационная помеха¹. Тогда в соответствии с оптимальным байесовским критерием значения D_Σ путем минимизации риска

$$R = \sum_{k=0}^1 \sum_{m=0}^1 \int \Pi_{mk} P(\gamma_m) P(D_\Sigma|\gamma_k) d(D_\Sigma)$$

разбиваются на две области: G_k – соответствующую распознаваемому объекту и G_m – соответствующую реверберационным помехам.

В результате разделения значений D_Σ на две области определяется величина ψ .

При отсутствии информации о функции потерь ($\Pi_{01} = \Pi_{10} = 0$, $\Pi_{00} = \Pi_{11} = 1$) и априорных вероятностях $P(\gamma_k)$, $P(\gamma_m)$ порог ψ определяется только на основе условных плотностей вероятностей:

$$\int_{G_k} P(D_\Sigma|\gamma_k) d(D_\Sigma) = 1 - \int_{G_m} P(D_\Sigma|\gamma_m) d(D_\Sigma)$$

или

$$\int_{\psi}^{\infty} P(D_\Sigma|\gamma_k) d(D_\Sigma) = 1 - \int_{-\infty}^{\psi} P(D_\Sigma|\gamma_m) d(D_\Sigma).$$

На рис. 3 приведен пример огибающей $S_\Sigma(t)$ при использовании $\zeta_1(t)$ после излучения $S_2(t)$ (рис. 2). Поскольку в этом случае максимум S_{mm} существенно превышает $\overline{S_\Sigma}(t)$, распознавание ТСФ выполняется при $D_\Sigma > \psi$. При этом уровень помех может быть соизмерим с $\overline{S_\Sigma}$, т. е. помехо-

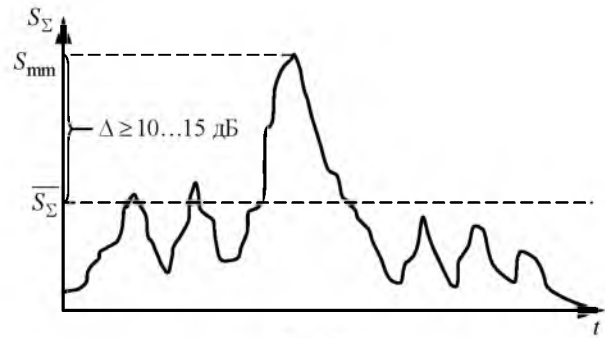


Рис. 3

защищенность возрастает на $\Delta = 10...15$ дБ по сравнению с распознаванием по одному зондирующему импульсу.

Таким образом может быть выполнена идентификация ТСФ, для которого известны эталонные значения $\{\tau_j\}$, или его распознавание от других ТСФ, а также от реверберационных и шумовых помех.

Если не требуется решать задачу идентификации ТСФ или их многоальтернативного распознавания, а достаточно распознать принятый гидролокационный сигнал от любого ТСФ (дна, аквалангиста, подводного робота и др.) на фоне случайных реверберационных помех, обусловленных объемной или поверхностной реверберацией, то на том же принципе применим разработанный метод переизлучения отраженных сигналов.

Метод переизлучения отраженных сигналов.

По этому методу один из принятых и записанных в память гидролокационных сигналов переизлучается в том же направлении, что и предыдущий зондирующий импульс, но в обратной временной последовательности [7]. При использовании коротких зондирующих импульсов $\zeta_1(t)$, пространственная длина которых $c\tau_3$ значительно меньше протяженности подводного объекта (τ_3 – длительность зондирующего импульса), из огибающей принятого сигнала $S_1(t)$ (рис. 2) сначала по специальному алгоритму выделяются существенные максимумы и на их основе формируется последовательность прямоугольных импульсов равной амплитуды $S_2(t)$ с задержками, расположенными в обратной последовательности относительно временных положений $\{\tau_j\}$ существенных максимумов, выделенных в огибающей принятого сигнала. При излучении $S_2(t)$ каждый сформированный импульс отражается от всех элементов облучаемых ТСФ и рассеивается на

¹ В силу введенных обозначений Π_{11} и Π_{00} есть значения функции потерь при верных решениях.

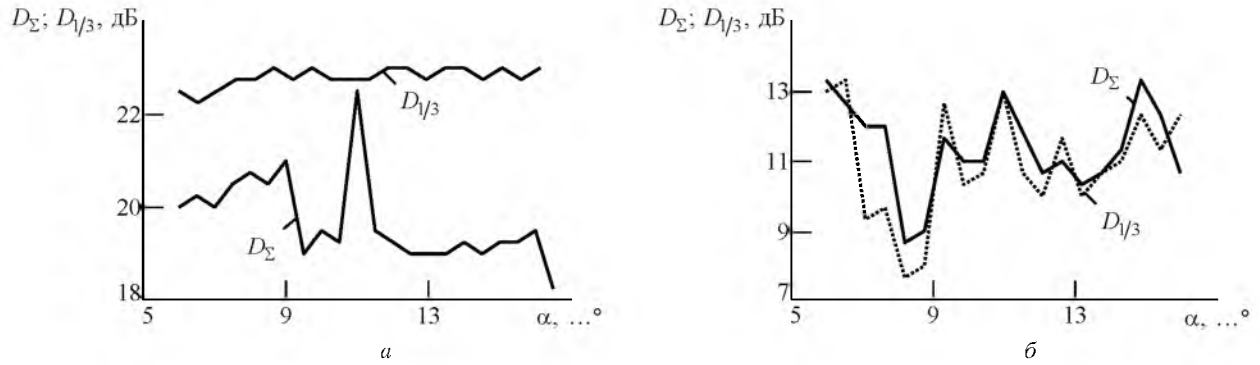


Рис. 4

взволнованной поверхности моря и рыбных скоплениях [7]. Так же, как при излучении эталонных сигналов (см. рис. 2), при совпадении $\{\tau_j\}$ и $\{\tau_v\}$ в $S_\Sigma(t)$ наблюдается глобальный максимум S_{mm} , превышающий средний уровень огибающей $\overline{S_\Sigma}(t)$. Если $S_2(t)$ формируется в виде суммы сложных зондирующих импульсов $\zeta_2(t)$, то короткий S_{mm} возникает в результате согласованной фильтрации $S_\Sigma(t)$ или вычисления ВКФ $S(\tau)$ эхосигнала $s(t)$ с копией сложного зондирующего импульса $\zeta(t)$:

$$S(\tau) = (E_\zeta E_s)^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} s_a^*(t) \zeta(t - \tau) dt,$$

где $E_\zeta = \int_{-\infty}^{\infty} |\zeta(t)|^2 dt$ – энергия зондирующего импульса;

$E_s = \int_{-\infty}^{\infty} |s(t)|^2 dt$ – энергия эхосигнала;

s_a^* – сигнал, комплексно-сопряженный с аналитическим сигналом $s_a = s + j\bar{s}$ (\bar{s} – мнимая часть аналитического сигнала, полученная преобразованием Гильберта).

Проверка формирования максимумов S_{mm} в $S_\Sigma(t)$ проводилась при модельных гидролокационных измерениях в гидроакустическом бассейне. Излучались короткие зондирующие импульсы $\zeta_1(t)$. Огибающая отраженного сигнала от ТСФ $S_1(t)$ регистрировалась в оперативном запоминающем устройстве, затем считывалась в обратном порядке. Из считанной огибающей, включающей несколько существенных максимумов, формировалась последовательность прямоугольных импульсов $S_2(t)$ и излучалась вновь в

направлении модели ТСФ. Эхосигналы от цели регистрировались при постоянном $S_2(t)$, сформированном при записи $S_1(t)$ для определения угла облучения модели (например, для результатов испытаний при $\alpha_0 = 10^\circ$, приведенных на рис. 4), а эхосигналы регистрировались в диапазоне углов облучения (например, $\Delta\alpha = 10^\circ$, т. е. для углов $5 \dots 15^\circ$). Средние значения огибающих определялись для всех H отсчетов суммарного сигнала $S_\Sigma(t)$:

$$\bar{S} = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H S_{\Sigma h},$$

а также для отсчетов на протяжении трети огибающей $S_\Sigma(t)$, исключая область S_{mm} ($\bar{S}_{1/3}$).

На рис. 4, а приведены примеры зависимостей $D_\Sigma = S_{\text{mm}}/\sqrt{\bar{S}_\Sigma}$ и $D_{1/3} = S_{\text{mm}}/\sqrt{\bar{S}_{1/3}}$ от угла облучения тела в горизонтальной плоскости α . На рис. 4, б дан пример этих зависимостей при облучении того же тела семью равноотстоящими импульсами (число максимумов в $S_\Sigma(t)$ соизмеримо с 7), что можно рассматривать как облучение тела чужим эталонным сигналом. Зависимости строились для зондирующих импульсов равной длительности. В целом отношения $D_{1/3}$ превышали D_Σ , но отличались незначительно. Значения отношений $D_{1/3}$ и D_Σ , полученные при излучении эталонных сигналов (рис. 4, а), на всех углах облучения превышали аналогичные значения при излучении равноотстоящих импульсов (рис. 4, б). Правильное распознавание тела выполнялось без ошибок на всех углах облучения.

Случайные реверберационные помехи, формируемые в результате рассеяния зондирующих импульсов на взволнованной поверхности моря и рыбных скоплениях, находящихся в постоянном движении, отличаются отсутствием устойчивости

временных положений максимумов $\{\tau_j\}$ в огибающей эхосигнала. Поэтому при переизлучении сигнала, рассеянного на указанных объектах, в суммарном сигнале $S_\Sigma(t)$ отсутствует существенный глобальный максимум S_{mm} . Поэтому отношение выявленного в огибающей $S(t)$ глобального максимума реверберационных помех S_{mm} к среднему уровню $\overline{S_\Sigma}$ не превысит порогового уровня: $D_\Sigma < \psi$.

Метод переизлучения отраженных сигналов позволяет с большей помехозащищенностью распознавать гидролокационные сигналы от ТСФ на фоне случайных реверберационных помех. Именно этим фактом может быть объяснено применение дельфинами последовательностей коротких зондирующих импульсов с неравными временными интервалами между ними [2]. Недостатком этого является необходимость переизлучения нескольких сигналов, что требует дополнительных затрат временных и энергетических ресурсов, а также некоторой реконструкции гидролокатора.

В отличие от метода обращения волнового фронта [8], [9], где добиваются фазового совпадения (фазового сопряжения) сигналов, в рассмотренных методах излучения эталонных сигналов и переизлучения отраженных сигналов повышение помехозащищенности происходит в результате энергетического сложения сигналов, отраженных от разных отражающих элементов ТСФ. Это совпадение на определенном временном интервале отраженных от разных элементов тела сигналов происходит в результате облучения ТСФ сигналом, состоящим из суммы зондирующих посылок, временные задержки между которыми согласованы с расстояниями между отдельными отражающими элементами лоцируемого тела.

Платой за повышение помехозащищенности при многоальтернативном распознавании является излучение нескольких эталонных сигналов, количество которых равно числу распознаваемых тел. При излучении эталонных сигналов не используется полная информация о распределении эталонных значений $\{\tau_j\}$, заложенная в условных

плотностях вероятностей $f\left(\bigcup_{i=1}^N \tau_j\right)$ [6]. При этом

обнаружение глобального максимума может выполняться с помощью оптимального критерия.

Оба рассмотренных метода фактически инвариантны к условиям многолучевого распространения сигналов в морской среде. При многолучевом распространении в $S_\Sigma(t)$ формируется не один S_{mm} , а несколько (в зависимости от гидрологических условий). Однако в этом случае не изменяется процедура принятия решений при идентификации и распознавания ТСФ на фоне реверберационных помех.

При реализации этих методов гидролокатор должен работать в несколько непривычном режиме. Если гидролокационные сигналы существенно (на 15...20 дБ) превышают шумовые помехи (что часто обеспечивается при использовании длинных сложных зондирующих посылок с последующим их сжатием, например в согласованном фильтре), то распознавать их на фоне случайных реверберационных помех можно обработкой после приема, регистрации и выделения огибающих с достаточно высокой помехозащищенностью по рассмотренному далее методу междуциклового корреляционной обработки.

Метод междуциклового корреляционной обработки сигналов (МКО) основан, аналогично предыдущим двум методам, на устойчивости классификационных признаков: временных положений существенных максимумов $\{\tau_\mu\}$ в огибающей эхосигнала или огибающей ВКФ эхосигнала от тела сложной геометрической формы с копией сложного зондирующего импульса и их сравнительной неустойчивости для случайных реверберационных помех [1], [7]. Модель эхосигнала от ТСФ может быть представлена в виде

$$s(t) = \sum_{\mu=1}^n s_\mu(t - \tau_\mu) + N(t) = \sum_{\mu=1}^n a_\mu \delta(t - \tau_\mu) \zeta(t) + N(t),$$

где s_μ – сигнал, отраженный от μ -го участка ТСФ; τ_μ – задержка сигнала $s_\mu(t)$ относительно $s_1(t)$; $N(t)$ – аддитивная помеха; a_μ – коэффициент, пропорциональный коэффициенту отражения импульса от μ -го участка поверхности тела; $\zeta(t)$ – зондирующий импульс; $\delta(\cdot)$ – дельта-функция. Для реверберационных помех принята известная модель ФОМ (П. Фора, В. В. Ольшевского, Д. Мидлттона) [1].

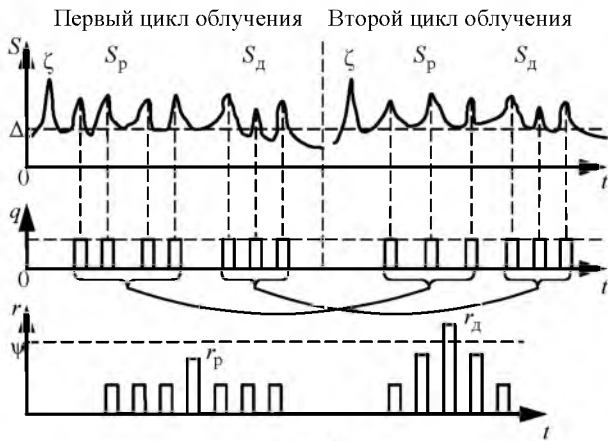
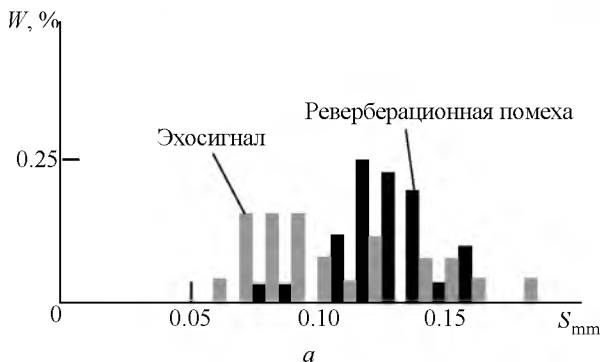


Рис. 5

В соответствии с методом МКО проводится совместная обработка гидролокационных сигналов в двух соседних циклах облучения подводной акватории. Излучаются сложные частотно-модулированные сигналы. Принимаемые эхосигналы обрабатываются в согласованном фильтре или вычисляется ВКФ эхосигнала с копией сложного зондирующего импульса.

Выделяются огибающие ВКФ: $S_d(\tau)$ – для ТСФ и $S_p(\tau)$ – для реверберационных помех (рис. 5). Из $S_d(\tau)$ и $S_p(\tau)$ выделяются существенные максимумы и из них формируются последовательности равноамплитудных прямоугольных импульсов $q_d(\tau_{v1})$ и $q_p(\tau_{v1})$ для первого цикла облучения акватории и $q_d(\tau_{v2})$ и $q_p(\tau_{v2})$ – для второго цикла (наличие импульса кодируется единицей, отсутствие – нулем). Затем между последовательностями $q_d(\tau_{v1})$, $q_d(\tau_{v2})$ и $q_p(\tau_{v1})$, $q_p(\tau_{v2})$ в двух соседних циклах облучения вычисляются знаковые корреляционные функции $r_d(\vartheta)$ и $r_p(\vartheta)$ соответственно:

$$r_{d(p)}(\vartheta) = \frac{1}{n} \sum_{v1, v2=1}^n q_{d(p)}(\tau_{v2}) \cap q_{d(p)}(\tau_{v1-\vartheta}).$$

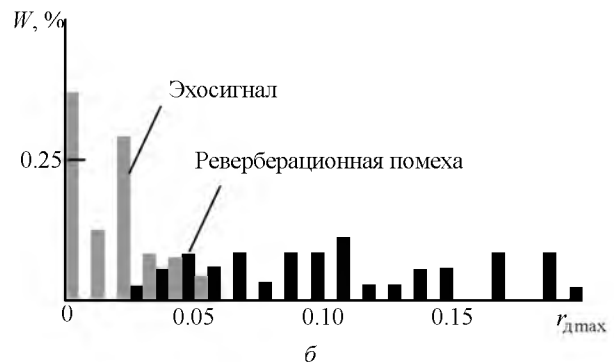


а

За счет устойчивости временных положений максимумов огибающей ВКФ для ТСФ $r_d(\vartheta)$ превышает $r_p(\vartheta)$ для реверберационных помех [1], [7]. При устойчивости признаков $\{\tau_v\}$ для ТСФ в нескольких циклах облучения применяются усредненные оценки $r_d(\vartheta)$. Тогда решение о распознавании ТСФ на фоне реверберационных помех может быть принято при сравнении $r_d(\vartheta)$ с порогом, определяемым согласно критериям Байеса, максимума апостериорной информации, Неймана–Пирсона или других в зависимости от известной априорной информации.

На рис. 6 представлены гистограммы значений анализируемых параметров: S_{mm} – при распознавании по отклику согласованного фильтра (рис. 6, а) и r_{dmax} – при распознавании по методу МКО (рис. 6, б), полученные в результате морских испытаний распознавания эхосигналов от жестких ТСФ на фоне реверберационных помех. Существенное перекрытие гистограмм на рис. 6, а и их относительное разделение на рис. 6, б свидетельствуют о потенциально лучших характеристиках метода МКО по сравнению с распознаванием по отклику СФ: в первом случае получена вероятность правильного распознавания 68_{-9}^{+10} %, а во втором – 100_{-6} % (индексы указывают доверительные интервалы для вероятностей правильного распознавания).

Пример результата обработки данных по методу МКО при использовании параметрического излучателя сигналов с линейной частотной модуляцией, девиацией частоты 7.7...15.3 кГц и с длительностью 2 мс представлен на рис. 7 в виде гистограмм максимальных значений корреляционных функций для эхосигналов: а – от аквиалангиста r_d ; б – от поверхностной реверберации r_p . Среднее значение $\bar{r}_d = 0.72$ (получено на ансамбле из 25 реализаций) для эхосигналов заметно



б

Рис. 6

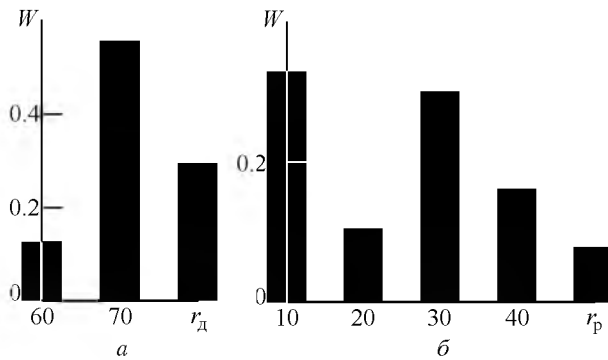


Рис. 7

превышает $\bar{r}_p = 0.26$ для поверхностной реверберации. Аналогичное соотношение подтверждается для других массивов данных.

Проведена обработка эхосигналов от рыбных скоплений (мелких и крупных рыб) и одиночных рыб, а также от донных отражений, полученных при использовании гидролокатора бокового обзора. Результаты обработки подтвердили возможность уверенного различения эхосигналов от косяков мелких рыб и от донных отражений на основе анализа значений \bar{r} . С меньшей вероятностью

правильного распознавания можно различить на основе \bar{r} эхосигналы от косяков крупных рыб на фоне донных отражений. Для крупных одиночных рыб \bar{r} может быть соизмеримо с \bar{r} для донных отражений. Таким образом, на основе \bar{r} возможно уверенно различать эхосигналы от косяков мелких рыб и аквалангиста, а для различения косяков и одиночных крупных рыб требуется привлечение дополнительных признаков.

По методу МКО обработан большой массив записей гидролокационных сигналов, полученных в морских условиях от ТСФ разной протяженности при использовании зондирующих импульсов с высоким разрешением по дальности расположения отражающих элементов с разным частотным заполнением. Во всех случаях получено уверенное распознавание гидролокационных сигналов от жестких ТСФ на фоне случайных реверберационных помех.

Представленные методы позволяют повысить помехозащищенность при идентификации и распознавании ТСФ на фоне случайных реверберационных помех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давыдов В. С. Распознавание в гидролокации. СПб: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2005. 352 с.
2. Иванов М. П. Эхолокационные сигналы дельфина при решении задач в сложных акустических условиях // Акустический журн. 2004. Т. 50, № 4. С. 1–12.
3. Давыдов В. С. Алгоритм выявления существенных максимумов в огибающей сигнала // Модели, алгоритмы, принятие решений: тез. 2-го Всесоюз. акуст. семинара, 10–14 окт. 1988 г., Ленинград / Акуст. ин-т им. Н. Н. Андреева АН СССР. М., 1988. С. 65–66.
4. Давыдов В. С. Исследование статистических свойств импульсных последовательностей, обусловленных группой жестко связанных отражателей // Обработка акустической информации в многоканальных системах. 1988. Вып. 15. С. 41–45.
5. Давыдов В. С. Оптимальное решающее правило для распознавания тел сложной геометрической формы по отраженным гидроакустическим сигналам // Акустические методы и средства исследования океана: тр. IV Дальневосточной конф. / Дальневосточный науч. центр, АН СССР. Владивосток. 1986. С. 32–36.
6. Давыдов В. С. Физико-математические основы многоальтернативного распознавания и идентификации гидролокационных полей тел сложной геометрической формы // Успехи физических наук. 2008. Т. 178, № 11. С. 1215–1219.
7. Давыдов В. С. Распознавание гидролокационных сигналов от морских подводных объектов сложной формы, перемещающихся в скрытых режимах, на фоне реверберационных помех // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2011. Вып. 5. С. 34–43.
8. Экспериментальная реализация обращения волнового фронта ультразвука с усилением / А. П. Брысев, Ф. В. Бункин, Л. М. Крутянский, А. Д. Стаховский // Изв. Академии наук. Секц. Физическая. 1996. Т. 60, № 12. С. 117–128.
9. Лямичев Л. М., Саков П. В. Обращение волнового фронта при нелинейном рассеянии звука на пульсирующей сфере // Акустический журн. 1988. Т. 34, вып. 1. С. 127–134.

V. S. Davidov

Saint-Petersburg state electrotechnical university "LETI"

Noise immunity increase of sonar signals from the complex bodies identification and recognition against reverberation interferences

Methods of identification and recognition of sonar signals reflected from the bodies with complex geometric shape have been developed and calibrated in hydroacoustic tank and at sea. Their greater noise immunity is achieved in comparison with well-known recognition methods. Comparison of these methods with wave front reversal method is given. Simulation results help to explain well-known fact that dolphins use multiple impulse sounding transmission with unequal interpulse periods.

Sonar signals, identification, recognition, reverberation, classification signs

Статья поступила в редакцию 16 января 2015 г.