

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Некоторые вопросы гидродинамики, квантовой электродинамики и лазерной спектроскопии

*Научная сессия Отделения физических наук
Российской академии наук, 14 мая 2008 г.*

В.С. Давыдов; В.М. Шабаев; Н.Н. Колачевский

PACS number: 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFNr.0178.200811d.1215

14 мая 2008 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева РАН состоялась Научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук. На сессии были заслушаны доклады:

1. **Давыдов В.С.** (Санкт-Петербургский электротехнический университет, С.-Петербург). *Физико-математические основы многоальтернативного распознавания и идентификации гидролокационных полей тел сложной геометрической формы.*

2. **Шабаев В.М.** (Санкт-Петербургский государственный университет, С.-Петербург). *Квантовая электродинамика тяжелых ионов и атомов: статус и перспективы.*

3. **Колачевский Н.Н.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Московский физико-технический институт, Москва). *Прецisionная лазерная спектроскопия холодных атомов и поиск дрейфа постоянной тонкой структуры.*

Краткое содержание докладов публикуется ниже.

PACS numbers: **43.30. + m, 43.60. + d, 92.10.Ve**
DOI: 10.3367/UFNr.0178.200811e.1215

Физико-математические основы многоальтернативного распознавания и идентификации гидролокационных полей тел сложной геометрической формы

В.С. Давыдов

1. Введение

В результате наблюдения подводной обстановки на экране гидролокационных станций (ГЛС) может наблюдаться одновременно несколько целей. Поэтому возникает необходимость их распознавания для принятия соответствующих обстановке решений.

Работам по распознаванию тел сложной геометрической формы, состоящим из отдельных конструктивных элементов, размеры которых в несколько раз превышают длины облучающих их волн, предшествовали теоретические и экспериментальные исследования клас-

сификационной информации гидролокационных полей, отраженных от тел простой геометрической формы (сфера, цилинды и т.д.), а также исследования способности дельфинов распознавать тела простой и сложной формы. Фактически возникла проблема создания автоматических систем распознавания тел сложной геометрической формы (к которым относятся реальные морские подводные объекты, дно и аквалангисты), реализующих способности дельфинов. С этой целью было решено использовать зондирующие импульсы с высоким разрешением по дальности расположения отдельных отражающих элементов тел сложной геометрической формы (короткие зондирующие импульсы, пространственная длина которых значительно меньше длины 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). Дельфины для распознавания подводных объектов используют короткие зондирующие импульсы. Построить подробное звуковое изображение объектов возможно только на чрезвычайно малых расстояниях вследствие ограниченных размеров гидроакустических антенн. Углы прихода отраженных от реальных удаленных объектов сигналов измерялись с погрешностью $\sim 10-15^\circ$.

2. Многоальтернативное распознавание тел сложной геометрической формы

При использовании зондирующих импульсов с высоким разрешением по дальности расположения отражающих элементов огибающая отраженного сигнала $S(t)$ (или огибающая взаимно корреляционной функции гидролокационного сигнала с копией зондирующего сложного импульса — ОВКФ) от тела сложной геометрической формы представляет собой монопиковую структуру. Существенные максимумы соответствуют отражению от отдельных отражающих элементов (рис. 1). В огибающей $S(t)$ было обозначено более 30 признаков, характеризующих конструктивные и акустические свойства распознаваемого тела. Необходимо было найти наиболее информативные признаки.

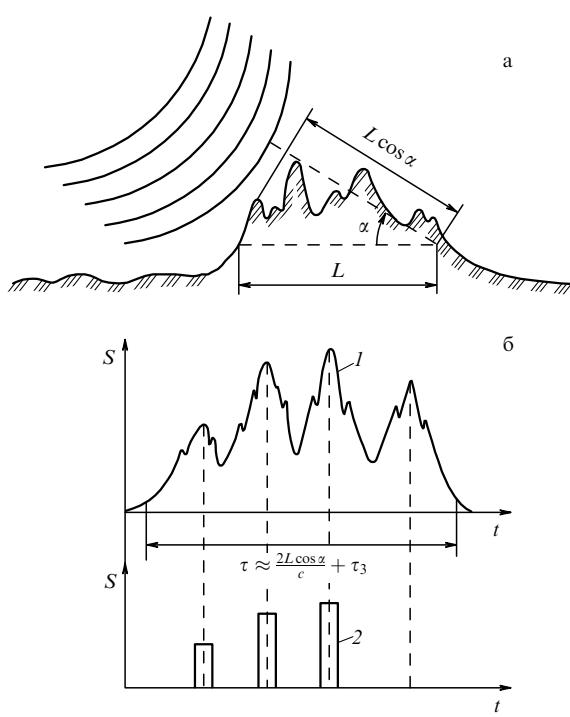


Рис. 1. (а) Отражение короткого зондирующего импульса от тела сложной геометрической формы. (б) Огибающая эхо-сигнала, отраженного от тела сложной геометрической формы протяженностью L , полученная при использовании короткого зондирующего импульса длительностью $\tau_\xi (ct_\xi/2 \ll L)$; 1 — экспериментальная огибающая; 2 — расчетная огибающая эхо-сигнала, полученная при учете только его зеркальной составляющей.

Для экспериментальных исследований были разработаны алгоритмы выделения признаков в $S(t)$, в том числе наиболее сложный алгоритм выделения существенных максимумов, основанный на выполнении двух соотношений для максимумов максиморумов и минимумов миниморумов [1]

$$\frac{S_j^{\max}}{S_{j-k}^{\min}} \geq \Delta, \quad \frac{S_j^{\max}}{S_{j+n}^{\min}} \geq \Delta.$$

(Правильность и оригинальность этого алгоритма подтверждена С.-Петербургским отделением Математического института им. В.А. Стеклова РАН.)

В результате экспериментальных исследований при физическом моделировании гидролокационных полей от тел сложной формы в гидроакустическом бассейне установлено, что амплитудные составляющие существенных максимумов чрезвычайно чувствительны к изменению углов облучения тел и для разных тел сложной формы гистограммы признаковых пространств амплитудных значений максимумов $\{S_j\}$ в значительной степени перекрываются. В то же время признаковые пространства временных положений максимумов $\{\tau_j\}$ являются более устойчивыми к изменениям углов облучения и заметно различаются для разных тел сложной формы в диапазонах углов локализации по $\sim 15^\circ$.

Для точной оценки информативности признаков необходимо было разработать оптимальные решающие правила распознавания гидролокационных сигналов от тел сложной формы на основе многомерных признаковых пространств.

В результате физических исследований показано, что законы распределения признаков $\{\tau_j\}$, $\{S_j\}$ и длительностей гидролокационных сигналов τ могут иметь в общем случае произвольный вид, в том числе многомодальный. Справедливость этого утверждения проверена на основе экспериментальных данных с помощью непараметрического критерия согласия Колмогорова–Смирнова [2]. Поэтому выполнялась аппроксимация условных плотностей вероятностей. Так как отдельные локальные максимумы $S_j(t, \alpha, \beta)$ (где α, β — углы облучения тела) в огибающей $S(t)$ формируются в результате отражения зондирующих импульсов от разных отражающих элементов, имеющих различные характеристики направленности, можно предполагать независимость флуктуаций временных положений $\{\tau_j\}$, амплитудных значений $\{S_j\}$ этих максимумов и длительностей τ . Эта гипотеза подтверждена в результате проверки экспериментальных данных с помощью критериев ранговой корреляции Спирмена и коэффициента конкордации [3]. Тогда условные многомерные плотности вероятностей признаковых пространств $\{\tau_j\}$, $\{S_j\}$, τ можно представить в виде произведений:

$$\begin{aligned} f\left(\bigcup_{j=1}^{n_i} \tau_j/A_i\right) &= \prod_{j=1}^{n_i} f(\tau_j/A_i), \\ f\left(\bigcup_{j=1}^{n_i} \hat{S}_j/A_i\right) &= \prod_{j=1}^{n_i} f(\hat{S}_j/A_i), \\ f\left(\bigcup_{j=1}^{n_i} \tau_j, \tau/A_i\right) &= \prod_{j=1}^{n_i} f(\tau_j/A_i) f(\tau/A_i). \end{aligned} \quad (1)$$

Это значительно упростило построение оптимальных решающих правил. Однако размерность признаковых пространств постоянно изменялась в зависимости от углов облучения. Было принято рассчитывать изменения размерностей признаковых пространств $\{\tau_j\}$, $\{S_j\}$ в процессе обучения путем определения априорных вероятностей появления и отсутствия существенных максимумов в определенных локальных областях и учитывать их в процессе распознавания. (Правильность и оригинальность такого решения подтверждена С.-Петербургским отделением Математического института им. В.А. Стеклова РАН.) Правила многоальтернативного распознавания гидролокационных сигналов на основе многомерных признаковых пространств $\{\tau_j\}$, $\{S_j\}$ и признака τ были сформулированы в соответствии с критерием максимального правдоподобия. При известных априорных вероятностях присутствия распознаваемых тел и заданных функциях потерь для ошибочного распознавания эти правила могут быть легко приведены к критерию Байеса. Для одномерного признака — длительности сигнала τ — с учетом аппроксимации условных одномерных плотностей вероятностей по методу Парзена–Розенблата правило имеет вид

$$\sup_i \{\varphi_i\} = \sup_i \left\{ \frac{1}{N_i N_i^{-1/4}} \sum_{k=1}^{N_i} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \frac{-1}{2\sigma^2} \left(\frac{\tau - \tau_{ki}}{N_i^{-1/4}} \right)^2 \right\}, \quad (2)$$

где τ — длительность измеренного эхо-сигнала, τ_{ki} — выборочные значения длительностей эхо-сигналов для i тел, измеренные в диапазоне углов облучения $\Delta\alpha, \Delta\beta$, N_i — число членов в обучающей выборке для i -го тела,

σ — усредненное среднеквадратическое отклонение длительностей эхо-сигналов τ .

При распознавании по правилу (2) измеряется длительность τ принятого эхо-сигнала и углы облучения тела α_r, β_r для i тел, берутся выборочные значения признаков τ_{ki} , соответствующие диапазону углов облучения $\Delta\alpha, \Delta\beta$, включающему в себя α_r, β_r , вычисляются функции правдоподобия φ_i и выносится решение о принадлежности измеренного признака τ i -му телу, если φ_i — наибольшая из всех $\{\varphi_i\}, i = 1, \dots, M$.

Оптимальное решающее правило для распознавания тел на основе многомерных признаковых пространств временных положений максимумов в эхо-сигналах $\{\tau_j\}$ по критерию максимального правдоподобия формируется с использованием их эталонов, строящихся в виде условных плотностей вероятностей в диапазонах углов облучения $\Delta\alpha, \Delta\beta$ с учетом изменения размерности признаковых пространств в виде априорных вероятностей появления k_{ji} и отсутствия $(1 - k_{ji})$ величин признаков в j -х эталонных областях для i -х тел [4, 5]:

$$\sup_i \{\varphi_i\} = \sup_i \left\{ \prod_{j=1}^m k_{ji} f(\tau_j/A_i) \prod_{j=m+1}^{n_i} (1 - k_{ji}) \right\}, \quad (3)$$

где m — число максимумов в измеренном эхо-сигнале, временные положения которых $\{\tau_j\}$ попали в j -е эталонные области i -го тела, n_i — число j -х эталонных областей i -го тела, $(n_i - m)$ — число эталонных областей i -го тела, в которые не попали временные положения максимумов $\{\tau_j\}$ в измеренном эхо-сигнале.

С учетом аппроксимации условных одномерных плотностей вероятностей по методу Парзена — Розенблата решающее правило (3) принимает вид [4, 5]

$$\begin{aligned} \sup_i \{\varphi_i\} = \sup_i & \left\{ \prod_{j=1}^m k_{ji} \frac{1}{N_{ji} N_{ji}^{-1/4}} \sum_{k=1}^{N_{ji}} \frac{1}{\sigma_\tau \sqrt{2\pi}} \times \right. \\ & \times \exp \left. \frac{-1}{2\sigma_\tau^2} \left(\frac{\tau_j - \tau_{jik}}{N_{ji}^{-1/4}} \right)^2 \prod_{j=m+1}^{n_i} (1 - k_{ji}) \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

где τ_j — временные положения максимумов в огибающей измеренного эхо-сигнала; τ_{jik} — выборочные значения временных положений максимумов для j -й эталонной области i -го тела, соответствующие диапазону углов облучения $\Delta\alpha, \Delta\beta$; N_{ji} — число выборочных значений τ_{jik} для j -й эталонной области i -го тела; σ_τ — усредненное среднеквадратическое отклонение для признакового пространства $\{\tau_j\}$.

Перед распознаванием по правилу (4), так же как при использовании признака τ , необходимо измерять углы облучения тела α_r, β_r и брать выборочные значения признаков τ_{jik} для диапазонов углов $\Delta\alpha, \Delta\beta$, включающих в себя α_r, β_r . Решение о принадлежности признакового пространства $\{\tau_j\}$, выделенного в измеренном эхо-сигнале, к i -му телу принимается по максимальному значению функции правдоподобия φ_i из всех $\{\varphi_i\}, i = 1, \dots, M$. На рисунке 2 приведен пример трехальтернативного распознавания тел на основе временных положений максимумов в огибающих эхо-сигналов $\{\tau_j\}$. Эталоны признаковых пространств $\{\tau_j\}$ для диапазона углов облучения 15° даны в виде условных плотностей вероятностей с учетом априорных вероятностей появления признаков в j -х областях $k_{ji} f(\tau_j/A_i)$. Ниже приведены

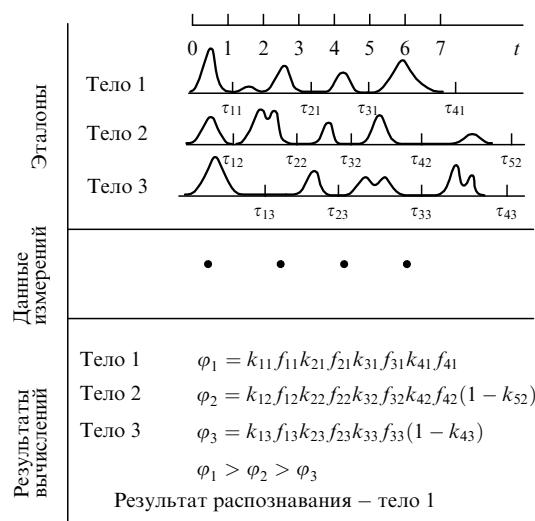


Рис. 2. Пример трехальтернативного распознавания тел сложной геометрической формы на основе признакового пространства временных положений максимумов в огибающих гидролокационных сигналов по оптимальному решающему правилу.

данные измерений временных положений максимумов $\{\tau_j\}$ в эхо-сигнале. Вычислены значения функций правдоподобия $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ для трех тел на основе этих данных. Наибольшее значение имеет φ_1 , поэтому в результате распознавания принято, что данные измерения $\{\tau_j\}$ принадлежат телу 1.

Оптимальное правило распознавания тел на основе нормированных амплитудных соотношений максимумов в огибающих эхо-сигналов $\{\hat{S}_j\}$ формируется, так же как правило (4), с использованием их эталонов в виде условных плотностей вероятностей и с учетом априорных вероятностей появления k_{ji} и отсутствия $(1 - k_{ji})$ признаков в определенных эталонных областях, рассчитанных на основе признаковых пространств $\{\tau_j\}$ соответственно.

Учитывая свойство совместной независимости признаков $\{\tau_j\}, \{\hat{S}_j\}$ и $\{\tau_j\}, \tau$, по аналогии с выше рассмотренными можно построить решающие правила при совместном использовании этих признаков [4]:

$$\begin{aligned} \sup_i \{\varphi_i\} &= \sup_i \left\{ \prod_{j=1}^m k_{ji} f(\tau_j/A_i) f(\hat{S}_j/A_i) \prod_{j=m+1}^{n_i} (1 - k_{ji}) \right\}, \\ \sup_i \{\varphi_i\} &= \sup_i \left\{ \prod_{j=1}^m k_{ji} f(\tau_j/A_i) f(\hat{S}_j/A_i) \prod_{j=m+1}^{n_i} (1 - k_{ji}) \right\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для оптимальных решающих правил распознавания тел на основе признаков $\{\tau_j\}, \{\hat{S}_j\}, \tau$ разработаны алгоритмы и рабочие программы для компьютера. Результаты альтернативного распознавания четырех тел сложной геометрической формы в диапазонах углов облучения $10-15^\circ$ приведены в таблице.

Наибольшая вероятность правильного распознавания тел получена на основе признакового пространства $\{\tau_j\}$ [4, 5]. Таким образом, подтверждена наибольшая информативность признакового пространства временных положений максимумов в огибающих эхо-сигналов $\{\tau_j\}$, определяемых взаимным расположением отражателей на теле сложной формы, по сравнению с признаками, связанными непосредственно с амплитудными значе-

Таблица. Результаты распознавания моделей, изготовленных в масштабе 1 : 100, отдельно на основе признаков $\{\tau_j\}$, $\{S_j\}$, τ

Частота, кГц	Номера моделей	Диапазоны углов локализации, град	Вероятность правильного распознавания по оптимальному решающему правилу, %		
			на основе $\{\tau_j\}$	на основе $\{S_j\}$	на основе τ
100	1, 2, 3, 5	5–20	89 (85–93)	55 (47–63)	65 (57–73)
1000	1, 2, 3	5–20	67 (57–77)		
350	1, 2, 3, 4	5–20	92 (87–97)	57 (47–67)	75 (65–85)
350	1, 2, 3, 4	22–38	79 (69–88)	39 (29–49)	40 (30–50)
350	1, 2, 3, 4	45–60	86 (79–92)	43 (33–53)	50 (40–60)
350	1, 2, 3, 4	60–75	76 (66–84)	43 (33–53)	32 (22–44)
350	1, 2, 3	105–120	76 (66–84)	48 (38–58)	24 (15–34)
350	1, 2, 3	135–150	95 (90–99)	62 (52–72)	62 (52–72)
350	1, 2, 3	160–175	100 (96–100)	76 (66–84)	71 (61–80)

ниями огибающих эхо-сигналов. Привлечение признаков $\{\hat{S}_j\}$ и τ в качестве дополнительных к признаковому пространству $\{\tau_j\}$ незначительно увеличивает вероятность правильного распознавания (на 3–5 %). При распознавании тел на основе $\{\tau_j\}$ без учета априорных вероятностей k_{ji} появления признаков в j -х эталонных областях вероятность правильного распознавания тел снижалась.

3. 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 использовании длинной зондирующей посылки, перекрывающей все распознаваемое тело. Для реальных объектов эта разность составляет 8–12 дБ. Распознавание тел сложной формы в морских условиях затруднено в результате многолучевого распространения сигналов в морской среде (что может быть иногда устранено путем адаптации правил распознавания). Поэтому был предложен новый принцип формирования гидролокационных сигналов и разработан метод излучения эталонных сигналов, в соответствии с которым информация о распознаваемом теле сложной формы в виде признакового пространства $\{\tau_j\}$ содержится в излучаемом сигнале.

Для повышения помехозащищенности идентификации тел сложной формы от воздействия мощных шумовых и реверберационных помех предлагается сформировать эталонный зондирующий сигнал в виде суммы коротких импульсов $\zeta_k(t)$ (или длинных сложных зондирующих импульсов $\zeta_c(t)$), задержки между которыми соответствуют расположенным в обратном порядке эталонным значениям взаимных положений максимумов $\{\tau_j\}$ в эхо-сигналах от распознаваемого тела для определенного диапазона углов облучения [4, 6]. Этalonные значения для каждого j -го максимума в данном случае определяются как средние значения τ_j для всех τ_j , выявленных при обучении в эхо-сигналах для j -й области в диапазоне углов $\Delta\alpha, \Delta\beta$. На рисунке 3а приведен пример огибающей отраженного сигнала $S(t)$ от тела сложной формы при использовании $\zeta_k(t)$ — короткого зондирующего импульса, в качестве огибающей излучаемого эталонного сигнала принята $S_2(t)$ с задержками $\{\tau_j\}$ между импульсами с амплитудами a_v (принятыми равными); схематично с учетом лишь зеркальных составляющих приведены огибающие сигналов $S_3(t)$, $S_4(t)$, $S_5(t)$, отраженных от каждого из трех элементов тела, и огибающая суммарного отраженного сигнала $S_\Sigma(t)$ от всего тела. Представляя передаточную функцию тела

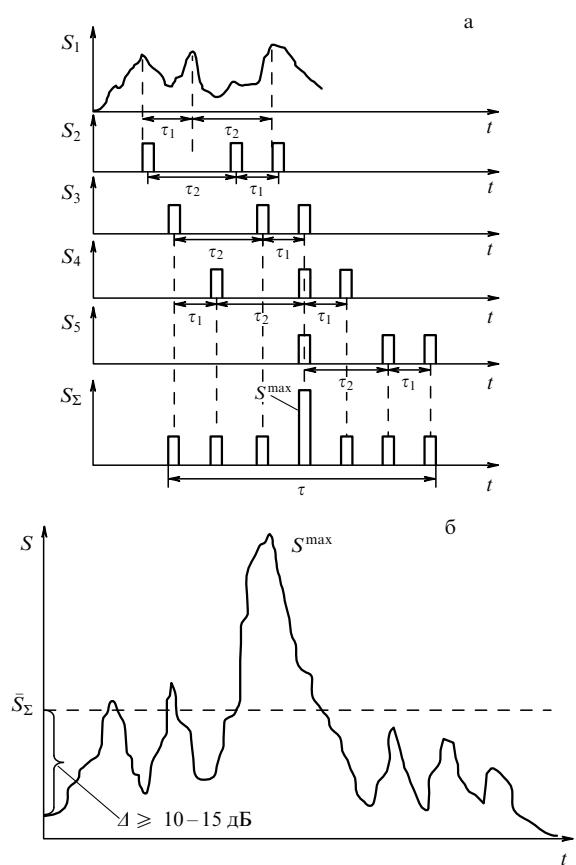


Рис. 3. (а) Схематичное представление формирования глобального максимума S^{\max} в суммарном сигнале $S_\Sigma(t)$, полученное в результате сложения отражений излученного сигнала $S_2(t)$ от всех трех отражателей тела сложной формы: $S_3(t)$, $S_4(t)$, $S_5(t)$ — сигналы, отраженные от 1-го, 2-го и 3-го отражателей соответственно. (б) Пример сформированного глобального максимума S^{\max} в $S_\Sigma(t)$.

сложной формы в виде набора дельта-импульсов с задержками $\{\tau_j\}$ и амплитудами a_j :

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

эхо-сигнал можно определить в виде свертки

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

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

При совпадении $\{\tau_j\}$ и $\{\tau_v\}$ сигнал $S_\Sigma(t)$ равен сумме отраженных сигналов от всех элементов тела. В форме $S_\Sigma(t)$ наблюдается глобальный максимум S_Σ^{\max} , превышающий средний уровень огибающей $\bar{S}_\Sigma(t)$ [4, 6]. Если $S_2(t)$ формируется в виде суммы длинных сложных зондирующих импульсов $\xi_c(t)$, то короткий S_Σ^{\max} наблюдается после согласованной фильтрации и детектирования $S_\Sigma(t)$. Распознавание тела сложной формы выполняется, например, при превышении отношением $S_\Sigma^{\max}/\bar{S}_\Sigma$ порогового уровня. Таким образом может быть выполнена идентификация тела сложной формы, для которого известны эталонные значения $\{\tau_j\}$, или его распознавание на фоне сигналов от других тел сложной формы, а также реверберационных и шумовых помех.

На рисунке 3б приведен пример огибающей $S_\Sigma(t)$ (при использовании $\xi_k(t)$) после излучения $S_2(t)$. В этом случае распознавание тела сложной формы выполняется при $S_\Sigma^{\max}/\bar{S}_\Sigma > \psi$, тогда уровень помех может быть соизмерим с \bar{S}_Σ , т.е. помехозащищенность возрастает на Δ [дБ] относительно таковой в методе распознавания при использовании одного зондирующего импульса.

Проверка этого метода излучения эталонных сигналов проводилась при модельных гидролокационных измерениях в гидроакустическом бассейне.

Строились зависимости $S_\Sigma^{\max}/\bar{S}_\Sigma$ и $S_\Sigma^{\max}/\bar{S}_{\Sigma_{1/3}}$ от углов облучения тела (где $\bar{S}_{\Sigma_{1/3}}$ означает, что среднее значение

сигнала измерялось на $1/3$ длительности $S_\Sigma(t)$ до появления S^{\max}). На рисунке 4а приведен пример этих зависимостей от угла облучения тела в горизонтальной плоскости $\alpha = 5-15^\circ$; эталонный сигнал был сформирован при облучении тела при $\alpha_0 = 10^\circ$. На рисунке 4б дан пример этих зависимостей при облучении того же тела семью равноотстоящими импульсами (число максимумов в $S_\Sigma(t)$ также порядка 7). Указанные зависимости строились для зондирующих импульсов равной длительности и равных диапазонов углов облучения тела. В среднем отношения $S^{\max}/\bar{S}_{\Sigma_{1/3}}$ превышали S^{\max}/\bar{S}_Σ , но отличались незначительно. Из сравнения графиков, приведенных на рис. 4а и б, видно, что отношения S^{\max}/\bar{S}_Σ и $S^{\max}/\bar{S}_{\Sigma_{1/3}}$, полученные при излучении эталонных сигналов на всех углах облучения, превышали значения этих отношений при излучении равноотстоящих импульсов, что соответствует облучению тела чужим эталонным сигналом. В этом случае правильное распознавание тела выполнялось без ошибок на всех углах облучения.

При таком подходе задача распознавания существенно упрощается и сводится фактически к задаче обнаружения глобального максимума. Платой за повышение помехозащищенности при многоальтернативном распознавании является необходимость излучения 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 $f(\cup_{i=1}^n \tau_j)$. Но обнаружение может выполняться с помощью оптимального критерия.

Предложенный метод наиболее удобен при идентификации известного тела на фоне шумовых и реверберационных помех, а также при распознавании тел сложной формы в условиях многолучевости. При многолучевом распространении сигналов в морской среде в $S_\Sigma(t)$ формируется не один максимум S_Σ^{\max} , а несколько (в зависимости от гидрологических условий). Однако в этом случае процедура идентификации тел сложной формы не изменяется.

Список литературы

- Давыдов В С "Алгоритм выявления существенных максимумов в огибающей сигнала", в сб. *Модели, алгоритмы, принятие решений: Тезисы 2-го Всесоюз. акустического семинара (10–14 окт. 1988 г., Ленинград)* (М.: Акуст. ин-т им. Н.Н. Андреева АН СССР, 1988) с. 65
- Бондарь Л Ф, Давыдов В С "Исследование функций распределения признаков, применяемых для распознавания подводных скал и донных грунтов", в сб. *Труды 9-й Всесоюз. конф. по информационной акустике (март 1985 г.)* (М.: Акуст. ин-т им. Н.Н. Андреева АН СССР, 1987) с. 98
- Давыдов В С "Исследование статистических свойств импульсных последовательностей, обусловленных группой жестко связанных отражателей", в сб. *Обработка акустической информации в многоканальных системах Вып.15* (Отв. ред. В В Ротин) (Л.: Судостроение, 1988) с. 41
- Давыдов В С *Распознавание в гидролокации* (СПб.: СПбГТЭУ "ЛЭТИ", 2005)
- Давыдов В С "Оптимальное решающее правило для распознавания тел сложной геометрической формы по отраженным гидроакустическим сигналам", в сб. *Человек и океан: Труды докладов IV Дальневосточной конф. "Акустические методы и средства исследования океана"* (Владивосток: АН СССР, Дальневосточный науч. центр, 1986) с. 32
- Давыдов В С "Повышение помехозащищенности распознавания тел сложной формы по отраженным акустическим сигналам" *Техническая акустика* 3 (1–2 (7–8)) 59 (1994)

Рис. 4. (а) Зависимость отношений амплитуд глобальных максимумов S^{\max} к средним уровням огибающих $S(t)$ от угла облучения α при излучении эталонного сигнала: 1 — зависимость S^{\max}/\bar{S} от α ; 2 — зависимость $S^{\max}/\bar{S}_{1/3}$ от α . (б) Зависимость отношений амплитуд глобальных максимумов S^{\max} к средним уровням огибающих $S(t)$ от угла облучения α при излучении семи равноотстоящих импульсов.

