

УДК 534. 883

А.Г.Голубев<sup>1</sup>

## АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ КООРДИНАТ ШУМЯЩЕГО ОБЪЕКТА В СИСТЕМЕ ПАССИВНОЙ ГИДРОЛОКАЦИИ

Под режимом пассивной гидролокации понимается совокупность процедур обработки информации для решения задач обнаружения сигналов шумоизлучения при их локализации в многомерном пространстве параметров. К этим параметрам, кроме пеленга, традиционно используемого в режиме шумопеленгования, могут относиться также дистанция, глубина погружения и показатель наклона спектра сигнала. В статье рассмотрены вопросы оценивания части этих параметров и помехоустойчивости трассового обнаружения при многомерном стробировании обнаруживаемых отметок.

В традиционном режиме шумопеленгования (ШП) реализуются обнаружение отметок, их пеленгование и трассовое обнаружение с дальнейшим сопровождением. Трассовое обнаружение и сопровождение при этом осуществляются с использованием одномерного (только по пеленгу) стробирования обнаруживаемых отметок. В процессе сопровождения в указанном режиме наряду со сглаживанием оценок пеленга решаются задачи оценивания дистанции и классификации.

В рассматриваемом в настоящей статье режиме пассивной гидролокации (ПГЛ) реализуется решение задачи оценивания дистанции не после, а одновременно с решением задачи трассового обнаружения. Решение задачи оценивания дистанции может быть принципиально основано на весовом осреднении оценок, полученных различными методами. На сегодня в части этой задачи оценивания представляется целесообразным ограничиться рассмотрением усовершенствованного энергетического метода. В связи с отсутствием априорных данных о показателе наклона спектра сигнала в точке его излучения процедуру оценивания дистанции целесообразно совместить с процедурой оценивания указанного показателя [1, 3]. В дополнение к дистанции представляется целесообразной и попытка оценивания глубины погружения источника шумоизлучения.

Решение задач оценивания дистанции и глубины в процессе трассового обнаружения связано с возможностью принятия классификационного решения одновременно с обнаружением трассы, т.е. с возможностью решения триединой задачи на дальности, близкой к дальности обнаружения отметок. Кроме того, при оценивании 3-х или 4-х параметров сигнала по каждой отметке возможен трассовый анализ с соответственно 3- или 4-мерным стробированием, что при прочих равных условиях обеспечивает снижение порогового сигнала (в сравнении с традиционным для режима ШП одномерным стробированием).

Настоящая статья посвящена рассмотрению вопросов оценивания ряда перечисленных параметров сигнала (а именно: алгоритма и погрешностей оценивания дистанции и показателя наклона спектра сигнала) и помехоустойчивости трассового анализа при трехмерном стробировании. Моделирование рассматриваемого в статье алгоритма оценивания осуществлено И.Л.Мисюченко.

**Алгоритм оценивания параметров отметок в пассивном режиме. Развитие энергетического метода оценивания дистанции.** При решении задачи синтеза предлагаемого алгоритма обработки данных рассматриваются следующие модели прогнозируемых энергетических спектров сигнала и помехи на выходе диаграммоформирователя:

<sup>1</sup> ОАО Концерн «Океанприбор» (Санкт-Петербург)  
© Голубев А.Г., 2008

- спектр помехи  $G_n(f_l) = P_n^2 f_l^{-\mu}$ ; (1)
- спектр сигнала  $G_{snp}(f_l, R, \nu) = P_s^2 f_l^{-\nu} Q 10^{-0,1 \beta(f_l) R}$ ,

где  $P_s$  - приведенный уровень сигнала в точке его излучения;  $\nu$  – показатель наклона спектра сигнала (оба параметра априорно неизвестны);  $P_n$  - приведенный уровень помехи в точке приема;  $l$  – индекс частоты.

Полагается также, что коэффициент пространственного затухания звука при распространении сигнала в среде определяется соотношением:

$$\beta(f) = a_1 + a_2 f^{a_3}, \quad (2)$$

где величина параметра  $a_1$  является несущественной (и может быть положена равной 0); величина параметра  $a_3$  на практике может быть неизвестной (при этом лишь увеличивается на единицу размерность пространства измеряемых параметров), однако без ограничения общности результатов в проведенных исследованиях она полагалась равной 3/2. Величина параметра  $a_2$  в пределах всего Мирового океана меняется в основном в диапазоне  $0,025 \pm 0,011$  (имеются в виду условия распространения, не связанные с контактами с волнующейся поверхностью моря). В конкретном районе эта величина может быть предсказана с относительной погрешностью порядка единиц процентов. Оценка возможных неточностей предсказания величины параметра  $a_2$  при работе в условиях, связанных с наличием контактов с волнующейся морской поверхностью, требует проведения дополнительных исследований, однако в принципе учет волнения при наличии контактов с поверхностью в методике и результатах решения задачи практически ничего не меняет.

Необходимо также заметить, что проблема, связанная с неточным знанием величины параметра  $a_2$ , отчасти преодолевается, если в зоне обзора есть хоть один шумящий объект, дистанция до которого относительно точно известна. В этом случае возможна калибровка района.

При частотной зависимости коэффициента пространственного затухания звука вида (2) на погрешность оценивания дистанции спектральным (энергетическим) методом из указанных параметров фактически влияет только погрешность предсказания величины параметра  $a_2$ , причем относительная систематическая погрешность оценивания дистанции в конкретных условиях обратно пропорциональна относительной погрешности предсказания величины параметра  $a_2$ .

В общем случае может рассматриваться модель частотной зависимости коэффициента пространственного затухания звука, определяемая, в частности, и дистанцией, и глубиной погружения цели. Кроме того, в реализованном подходе к синтезу тракта в принципе ничего не меняется при использовании и какой-либо другой формулы, отражающей частотную зависимость коэффициента пространственного затухания звука, например, формулы Торпа. Зависимость (2) в плане качества оценивания дистанции (наличия систематической ошибки) является наиболее неблагоприятной. На величину флюктуационной ошибки оценивания дистанции возможное незнание величины параметра  $a_2$  не влияет.

Задача оценивания дистанции в аналогичной постановке, включающей неизвестный показатель наклона спектра сигнала и предполагающей оценивание дистанции одновременно с оцениванием этого параметра наклона, решалась в [1]. Указанное решение осуществлялось в терминах оценки параметров. В настоящем исследовании данную задачу предлагается решать в терминах проверки гипотез. При этом область возможных значений оцениваемых параметров квантуется (делится на альтернативы), а алгоритм оценивания сводится к вычислению функции правдоподобия наблюдаемой выборки (накопленного в каждом пространственном канале энергетического спектра) для каждого из всех возможных сочетаний альтернатив параметров сигнала. При имеющих место на практике малых

отношениях сигнал/шум оптимальным в свете критерия максимального правдоподобия является алгоритм экартовской фильтрации.

Рассмотрим вначале задачу обработки сигналов в тракте с антенной малых по вертикали волновых размеров. В этом случае рассматривается двумерное пространство параметров принимаемого сигнала. Обозначим  $k$ -ю альтернативу дистанции как  $D_k$  (где, например,  $D_k = k \cdot \delta_d$ , причем  $\delta_d$  – выбранный шаг при делении диапазона возможных дистанций на альтернативы). При этом основная процедура, обеспечивающая оценивание искомых параметров, состоит в следующем. Формируются АЧХ экартовских фильтров  $H_{kvl}$ , настроенных на возможные сочетания альтернатив дистанции и параметра наклона спектра сигнала шумоизлучения

$$H_{k,v,l} = \frac{G_{snp}(f_l, R, \nu)}{G_n^2(f_l)} \cdot M^{-1}_{k,v}, \quad (3)$$

где спектры помехи и сигнала соответствуют моделям (1); параметр  $\mu$  модели спектра помехи при моделировании принимался равным 4 (что соответствует показателю наклона спектра помехи 2 и использованию двумерной антенны). При реализации алгоритма в реальных условиях вместо указанной модели спектра помехи используется результат его текущего оценивания.

Каждая АЧХ нормируется в обеспечение выравнивания уровней помех на выходах всех фильтров. При этом масштабный множитель  $M$  вычисляется по формуле:

$$M_{k,v} = \sqrt{\frac{\sum_l G_{snp}^2(f_l, R, \nu)}{\sum_l G_n^2(f_l)}}.$$

Полученный при пространственной обработке в каждом направлении обзора спектр принимаемого сигнала  $G_j(f_l)$  (где  $j$  – индекс номера направления наблюдения) «пропускается» через двумерную гребенку фильтров Эккарта. Совокупность результатов указанной фильтрации  $Z_{j,k,v}$  определяется как:

$$Z_{j,k,v} = \sum_l G_j(f_l) \cdot H_{k,v,l}. \quad (4)$$

Оценки дистанции и параметра наклона спектра сигнала шумоизлучения по всем отметкам вырабатываются по номерам (индексам  $k$  и  $v$ ) тех фильтров, в которых отклики на спектры сигналов максимальны. Процедура выработки оценок реализуется в тех направлениях обзора, в которых обнаружены отметки. Процедура обнаружения отметки в конкретном направлении обзора основана на отборе максимума из всех откликов фильтров Эккарта соответствующего пространственного канала и сравнении его с порогом и/или с аналогичными максимумами, полученными в смежных пространственных каналах. Определенные таким образом параметры полезного сигнала позволяют вычислить оценки дистанции и показателя наклона спектра с точностью до размеров квантов этих параметров ( $\delta_d$  и  $\delta_\nu$ ). Далее указанные оценки могут быть уточнены за счет соответствующей интерполяции либо реализации дополнительной фильтрации аналогичной алгоритму (4) в стробе дистанций и показателей наклона спектра при уменьшенных размерах квантов этих параметров.

Усовершенствование энергетического метода оценивания в данном случае состоит в том, что дистанция оценивается одновременно с показателем наклона спектра. Это дает основание рассчитывать на нивелирование компоненты ошибок оценивания дистанции классическим энергетическим методом (предусматривающим решение задачи при предполагаемом *фиксированном* значении показателя наклона спектра), обусловленных неточным заданием указанного показателя.

Для устранения влияния на качество измерения дистанции возможных дискрет в спектре несущей применяется медианная фильтрация в спектральной области.

Для минимизации негативного влияния на точность оценивания дистанции частотных искажений сигнала, имеющих место при пространственной фильтрации, необходимо по возможности минимизировать шаг по углу между смежными направлениями обзора.

При работе с антеннами, волновые вертикальные размеры которых относительно велики (больше  $(3...4)\lambda$  на верхней частоте диапазона), принципиально возможна реализация режима ПГЛ с дополнительным измерением глубины погружения шумящего объекта. Для этого на основе гидрологоакустических расчетов формируются прогнозируемые распределения энергии принимаемого сигнала по вертикальным углам прихода для всех сочетаний альтернатив дистанции и глубины погружения источника шумоизлучения. На основе прогнозируемых распределений энергии для всех сочетаний дистанции, глубины погружения и параметра наклона спектра с учетом частотных характеристик вертикального диаграммоформирователя рассчитываются АЧХ фильтров Эккарта (аналогично рассмотренному выше случаю малых вертикальных размеров антенны) в каждом вертикальном ярусе ХН, а также квазиоптимальные веса для сложения выходов ярусов в одноименных горизонтальных направлениях. При этом в каждом направлении обзора по горизонтали реализуется трехмерная гребенка пространственно-временных фильтров, настроенных на сочетания альтернатив искомым параметрам сигналов.

Подобная задача измерения дальности и глубины в режиме ПГЛ разрабатывалась в Акустическом институте В.В.Бородиным [2]. В указанном исследовании была рассмотрена модель канала распространения с детерминированными параметрами, прогнозирование которых осуществляется без погрешностей. При этом полученные результаты определяли недостижимую нижнюю границу погрешности оценивания координат цели. Настоящее исследование основано на модели канала распространения с квазидетерминированными параметрами; при этом результаты расчета поля сигнала фактически трактуются как математические ожидания плотностей распределений параметров канала распространения.

Как отмечено выше, при наличии близко расположенной и относительно сильно шумящей цели в обеспечение калибровки района (например, уточнения значения параметра  $a_2$  в выражении для расчета величины  $\beta$ ) целесообразно комбинировать усовершенствованный энергетический метод измерения дистанции с методом, основанным на реализации фокусировки по дальности при пространственной фильтрации в горизонтальной плоскости.

**Результаты моделирования режима ПГЛ.** При моделировании осуществлялась генерация сигналов и помех в соответствии с их моделями, описанными ранее. При этом каждый мгновенный первый отсчет спектра смеси сигнала с помехой (квадрат модуля результата пространственной фильтрации  $l$ -й спектральной компоненты принимаемой смеси) генерировался как выборка из экспоненциальной плотности с единичными средним значением, домноженная на величину масштабного множителя равного

$$G(f_l) = G_n(f_l) + G_s(f_l, R, \nu)$$

при показателе наклона спектра помехи  $G_n(f_l)$  (см. (1))  $\mu = 4$ , что, как отмечено выше, соответствует ситуации использования двумерной антенны.

Значения параметров  $\nu$  и  $R$ , выбираемые при генерации спектров сигнала (в частности, значения  $\nu$  равными 1.8, что соответствует наклону 5.5 дБ/окт), измерителю не «сообщались». Рабочий диапазон частот при моделировании составлял 0.3–8.0 кГц.

Моделирование проводилось при фиксированных отношениях сигнал/шум  $\theta$  на индикаторе, вычисляемых как:

$$\theta = 10 \lg q = 10 \lg \left[ \sqrt{n \cdot \sum_{l=l_n}^{l_g} G_{snp}^2(f_l, R) / G_n^2(f_l)} \right],$$

где  $l_n$  и  $l_g$  – номера соответственно нижней и верхней спектральных компонент сигнала и помехи, причем принималось значение  $l = f_l$  (в Гц);  $n$  – число реализаций спектров, накапливаемых за один цикл измерения, равное интервалу накопления в секундах. При моделировании принималось  $n = 12$ . Необходимо заметить, что при фиксации индикаторного отношения сигнал/шум на выбираемом уровне фактическое время последетекторного накопления становится несущественным параметром.

Рассматривались ситуации  $\theta = 3, 0$  и  $-3$  дБ. Требуемая величина  $\theta$  устанавливалась для каждой альтернативы дистанции соответствующим расчетом отношения  $P_s / P_n$ .

Результаты моделирования приведены в таблицах 1-6, где обозначены  $R$  – фактическая дистанция;  $\sigma_R$  – эмпирическая относительная стандартная ошибка оценивания дистанции (в процентах);  $\sigma_v$  – эмпирическая стандартная ошибка оценивания параметра наклона спектра сигнала «v» (в дБ/окт),  $\Pi$  – величина порога (при равенстве единице стандарта помехи и равенстве нулю ее математически ожидания), при превышении которого максимальным из откликов гребенки фильтров результат соответствующего эксперимента учитывался при оценке эмпирических стандартов. Величина стандарта помехи на выходе каждого фильтра Экарта равна единице в связи с использованием при реализации алгоритма фильтрации (см.(4) с учетом (3)) масштабного множителя  $M^{-1}_{k,v}$ . Процедура центрирования помехи, состоящая в вычитании из результата фильтрации (4) константы, для простоты опущена.

Таблица 1

$\Pi = -\infty$	$R$ , км	$\sigma_R$ , %	$\sigma_v$ , дБ/окт
$\theta = 3$ дБ	10	21	0,34
	20	17	0,32
	30	17	0,29
	40	11	0,25
	50	11	0,23
	60	11	0,21
	70	9	0,22
	80	9	0,3
$\theta = 0$ дБ	10	30	0,37
	20	21	0,34
	30	20	0,31
	40	14	0,28
	50	12	0,25
	60	12	0,24
	70	11	0,27
	80	12	0,36
$\theta = -3$ дБ	10	35	0,42
	20	23	0,38
	30	22	0,37
	40	16	0,29
	50	12	0,26
	60	13	0,26
	70	11	0,29
	80	12	0,34

Таблица 2

$\Pi = 0$	$R$ , км	$\sigma_R$ , %	$\sigma_v$ , дБ/окт
$\theta = 3$ дБ	10	19	0,31
	20	15	0,29
	30	15	0,26
	40	10	0,23
	50	10	0,21
	60	10	0,19
	70	9	0,20
	80	9	0,27
$\theta = 0$ дБ	10	28	0,34
	20	19	0,31
	30	19	0,28
	40	13	0,25
	50	11	0,23
	60	11	0,22
	70	10	0,25
	80	11	0,33
$\theta = -3$ дБ	10	32	0,38
	20	21	0,35
	30	20	0,34
	40	14	0,26
	50	11	0,24
	60	12	0,24
	70	10	0,26
	80	11	0,33

Таблица 3

$\Pi = 0,5$	$R$ , км	$\sigma_R$ , %	$\sigma_v$ , дБ/окт
$\theta = 3$ дБ	10	13	0,23
	20	10	0,21
	30	10	0,19
	40	7	0,17
	50	7	0,15
	60	7	0,14
	70	6	0,15
	80	6	0,20
$\theta = 0$ дБ	10	20	0,25
	20	13	0,23
	30	13	0,21
	40	9	0,19
	50	7	0,17
	60	7	0,16
	70	7	0,18
	80	7	0,24
$\theta = -3$ дБ	10	22	0,28
	20	15	0,25
	30	14	0,25
	40	10	0,19
	50	8	0,17
	60	8	0,17
	70	7	0,19
	80	8	0,25

Таблица 4

П = 1	R, км	$\sigma_R$ , %	$\sigma_v$ , дБ/окт
$\theta = 3$ дБ	10	12	0,14
	20	9	0,13
	30	9	0,12
	40	6	0,10
	50	6	0,09
	60	6	0,08
	70	5	0,09
	80	6	0,12
$\theta = 0$ дБ	10	17	0,15
	20	12	0,14
	30	11	0,12
	40	8	0,11
	50	7	0,10
	60	7	0,10
	70	6	0,11
	80	7	0,14
$\theta = -3$ дБ	10	20	0,17
	20	13	0,15
	30	12	0,15
	40	9	0,12
	50	7	0,10
	60	7	0,10
	70	6	0,12
	80	7	0,14

Таблица 5

П = 1,5	R, км	$\sigma_R$ , %	$\sigma_v$ , дБ/окт
$\theta = 3$ дБ	10	10	0,12
	20	8	0,11
	30	8	0,10
	40	6	0,09
	50	6	0,08
	60	6	0,07
	70	5	0,08
	80	5	0,10
$\theta = 0$ дБ	10	15	0,13
	20	10	0,12
	30	10	0,11
	40	7	0,09
	50	6	0,09
	60	6	0,08
	70	5	0,09
	80	6	0,12
$\theta = -3$ дБ	10	16	0,15
	20	10	0,13
	30	10	0,13
	40	7	0,11
	50	6	0,09
	60	6	0,08
	70	5	0,10
	80	6	0,12

Таблица 6

П = 2	R, км	$\sigma_R$ , %	$\sigma_v$ , дБ/окт
$\theta = 3$ дБ	10	8	0,10
	20	6	0,09
	30	6	0,08
	40	4	0,08
	50	4	0,07
	60	4	0,06
	70	4	0,06
	80	4	0,09
$\theta = 0$ дБ	10	12	0,11
	20	8	0,10
	30	8	0,09
	40	6	0,08
	50	5	0,08
	60	5	0,07
	70	4	0,08
	80	5	0,10
$\theta = -3$ дБ	10	14	0,13
	20	9	0,11
	30	9	0,11
	40	6	0,09
	50	5	0,08
	60	5	0,07
	70	4	0,08
	80	5	0,11

При моделировании альтернативы дистанции выбирались в диапазоне 0-80 км с шагом 1 км, а альтернативы наклона спектра сигнала в диапазоне от 3 дБ/окт до 8 дБ/окт с шагом 0,25 дБ/окт. При моделировании каждая ситуация воспроизводилась (некоррелированными выборками) по 100 раз. Величина коэффициента пространственного затухания звука рассчитывалась по формуле  $\beta = 0,026 f^{3/2}$ .

Полученный при моделировании немонотонный характер зависимостей величины  $\sigma_v$  от дальности предположительно объясняется следующим образом. При увеличении дальности от единиц до нескольких десятков километров рабочий диапазон частот тракта ПГЛ все более оптимизируется в плане качества решения задач оценивания как дистанции, так и параметра наклона спектра. Одновременно с этим при снижении относительной ошибки оценивания дистанции с увеличением дистанции растет абсолютная ошибка этого оценивания. Ошибки оценивания дистанции и параметра наклона спектра существенно коррелированы; при этом рост абсолютной ошибки оценивания дистанции предопределяет и рост ошибки оценивания параметра наклона спектра. Если на дистанциях менее 40-50 км последний эффект компенсировался указанной выше оптимизацией частотного диапазона тракта, в результате чего величина  $\sigma_v$  с увеличением величины  $R$  уменьшалась, то на дистанциях более 40-50 км указанный компенсирующий фактор, судя по всему, работать перестает (поскольку оптимальная частота при этом близка к середине рабочего диапазона), и начинается рост величины ошибки  $\sigma_v$  как функции дальности.

Как было отмечено ранее, компонента ошибки, обусловленная неточным знанием величины параметра  $a_2$  в выражении для расчета коэффициент пространственного затуха-

ния звука (по крайней мере в условиях отсутствия контактов лучей с волнующейся водной поверхностью), не превышает величины единиц процентов (в известных формулах для расчета величины  $\beta$  значение этого параметра для различных регионов Мирового океана задается двумя значащими цифрами). При этом соответствующая стандартная компонента относительной ошибки измерения дистанции имеет порядок 1%; регулярная для конкретных условий распространения ошибка может рассматриваться как «медленно» флюктуирующая для общих условий. Величина данной компоненты ошибки при фиксированных условиях от интервала наблюдения (оценивания) не зависит. Поэтому ожидаемую величину стандартной относительной ошибки оценивания дистанции при произвольном (например, более 12 с) времени измерения  $T_{\Sigma}$ , т.е. при трассовом анализе можно оценить по формуле:

$$\sigma_R(T_{\Sigma}) \approx \sqrt{\frac{\sigma_R^2}{N \cdot \eta} + 0.01^2} \approx \sqrt{\frac{\sigma_R^2}{N \cdot \eta}},$$

где  $N = T_{\Sigma} / \tau$ ,  $\tau$  – интервал некогерентного накопления,  $\sigma_R$  – величина стандартной относительной ошибки из соответствующей таблицы,  $\eta$  – коэффициент, учитывающий долю фактически обнаруженных отметок из их общего числа  $N$ ; так, при пороговом сигнале  $\eta \approx 1,5 \sqrt{N}$ .

Далее при вычислении размеров строба по дистанции при обнаружении трасс учитывается только та компонента ошибки, стандарты которой приведены в табл. 1-6.

Необходимо отметить, что использованный в настоящей статье подход к задаче оценивания параметров в терминах проверки гипотез обеспечивает более эффективное решение, чем подход, использованный в [1] на основе “аппарата линейного регрессионного анализа”. Так, если в [1] речь идет о достижении относительной среднеквадратичной погрешности оценивания дистанции около 10 % при индикаторном отношении сигнал/шум 10-20 дБ, то в настоящей работе при дистанциях более 30-50 км достигнуты примерно такие же погрешности при индикаторном отношении сигнал/шум 0 дБ. Сравнение же достигаемых погрешностей при работе на относительно малых дальностях некорректно, поскольку моделирование предлагаемого алгоритма проведено для верхней частоты всего 8 кГц. Реализация упомянутой в [1] верхней частоты 48 кГц на практике (по крайней мере, на сегодня) невозможна.

**Особенности обнаружения трасс в режиме ПГЛ.** Обнаружение трасс в режиме ПГЛ в рассматриваемом в настоящем исследовании варианте осуществляется по критерию Вальда с выработкой стробов (после завязки трассы) по пеленгу, дистанции и показателю наклона спектра сигнала шумоизлучения. Возможность стробирования по глубине погружения не учитывается, поскольку в рамках настоящей проработки достижимые количественные параметры строба по глубине не оценивались. Указанная возможность стробирования по глубине является дополнительным резервом повышения помехоустойчивости обнаружения трасс в рассматриваемом режиме.

Размер каждого строба должен определяться геометрической суммой стандартов ошибки одиночного измерения соответствующего параметра и ошибки экстраполяции этого же параметра. Полагаем, что процедура Вальда реализуется в реальном масштабе времени с выработкой указанных (относительно широких) стробов. Далее после вынесения предварительного решения об обнаружении трассы осуществляется фильтрация параметров (по которым проведено стробирование), после чего процедура Вальда повторяется ретроспективно с уменьшенными размерами стробов, при расчете которых ошибками экстраполяции (в варианте ретроспективного анализа указанные ошибки фактически становятся ошибками интерполяции) пренебрегаем. Окончательное решение об обнаружении трассы принимается по повторно реализованной процедуре Вальда. В связи с изложенным, далее помехоустойчивость трассового обнаружения анализируется применительно к

ситуации ретроспективного анализа, при которой размеры стробов определяются только стандартами ошибок одиночных (мгновенных) оценок параметров отметок.

Завязка трассы (траектории) осуществляется при превышении одной отметкой порога  $\Pi_3$ , после чего реализуется выработка стробов по пеленгу, дистанции и показателю наклона спектра на основе результатов оценивания соответствующих параметров этой и последующих отметок. Далее при проведении анализа полагаем, что уровень отметки соответствует пороговому, а интервал анализа фиксирован (хотя это несколько противоречит смыслу критерия Вальда) и равен  $N\tau$ . При пороговых сигналах размер строба по пеленгу устанавливается равным ширине ХН в горизонтальной плоскости на эффективной частоте. При завязке траектории на  $n$ -м шаге обновления результатов некогерентного накопления процедура принятия решения в конце интервала наблюдения фактически имеет вид:

$$\lg \frac{P_{об_i}}{P_{лм_i}} + k \lg \frac{\dot{P}_{об_i}}{P_{лм_i}} + (N - n - k) \lg \frac{1 - \dot{P}_{об_i}}{1 - \dot{P}_{лм_i}} > \lg \frac{P_{об_\Sigma}}{P_{лм_\Sigma}}, \quad (5)$$

где  $P_{об_i}, \dot{P}_{об_i}, P_{об_\Sigma}$  – соответственно вероятности правильного обнаружения отметки при пороге  $\Pi_3$ , при пороге  $\Pi$ , а также требуемая вероятность обнаружения трассы;  $P_{лм_i}, \dot{P}_{лм_i}, P_{лм_\Sigma}$  – соответственно вероятности ложной тревоги при обнаружении отметок с порогом  $\Pi_3$ , с порогом  $\Pi$  (с учетом трехмерного строба), а также допустимая вероятность ложной тревоги при обнаружении трассы;  $\Pi$  – порог, устанавливаемый после завязки траектории;  $k$  – число обнаружений отметок, попавших в стробы обнаружения.

$$P_{лм_i} = k_{лм1} \int_{\Pi_3}^{\infty} N_x(0;1) dx; \quad \dot{P}_{лм_i} = k_{лм2}^{-1} \int_{\Pi}^{\infty} N_x(0;1) dx \quad (6)$$

$$P_{об_i} = \int_{\Pi_3}^{\infty} N_x(Q;1) dx; \quad \dot{P}_{об_i} = \int_{\Pi_3}^{\infty} N_x(Q;1) dx,$$

где  $N_x(a, b)$  – нормальная плотность со средними « $a$ » и стандартом « $b$ »;  $k_{лм1}$  – коэффициент, учитывающий увеличение вероятности ложной тревоги при обнаружении отметки (до момента завязки траектории) за счет того, что решающая статистика формируется путем отбора максимума из откликов гребенки фильтров Эккарта каждого пространственного канала обработки;  $k_{лм2}^{-1}$  – коэффициент, учитывающий уменьшение вероятности ложной тревоги при обнаружении отметки (после момента завязки траектории) за счет того, что при завязке строб выработан не только по пеленгу, но и по дистанции и по показателю наклона спектра сигнала шумоизлучения.

При заданных порогах  $\Pi_3$  и  $\Pi$  и фиксированном « $n$ » совокупность соотношений (5) и (6) определяет то критическое значение  $k = k_{min}$ , ( $k$  – число отметок, попавших в выработанный при завязке траектории строб) при превышении которого вес Вальда в конце интервала наблюдения будет не менее порога, чем обеспечится обнаружение трассы с заданными вероятностными характеристиками. При этом вероятность такого события (обнаружения трассы) при произвольном значении « $n$ » ( $1 \leq n \leq N-1$ ) равна:

$$W(q) = \sum_{n=1}^{N-1} P_{об_i} (1 - P_{об_i}) \sum_{m=k_{min}}^{N-m} C_{N-m}^m \dot{P}_{об_i} (1 - \dot{P}_{об_i})^{N-m-1}. \quad (7)$$

Задача анализа помехоустойчивости рассматриваемого трассового анализа решается итерационно (по методу последовательных приближений) путем предварительной выработки экспертной оценки величины порогового отношения сигнал/шум  $Q_0$  (например,

$Q_0=2$ ), выборки из табл. 1-6 соответствующих этому значению  $Q_0$  величин относительных стандартов ошибок оценивания параметров сигнала (для интересующих нас фактических значений дистанции и показателя наклона спектра) и определения соответствующих этим ошибкам стробов обнаружения трассы. Далее реализуется программа, вычисляющая значение пороговых отношений сигнал/шум  $Q$  (как функции порогов  $\Pi_3$  и  $\Pi$ ) по формулам (5)-(7) и находящая те значения порогов, при которых величина  $Q$  минимальна, а также соответствующие значения величин  $k_{\text{лм1}}$  и  $k_{\text{лм2}}$ . При этом рассмотрен следующий вариант функциональной зависимости между порогами  $\Pi_3$  и  $\Pi$ :

$$k_{\text{лм1}} \int_{\Pi_3}^{\infty} N_x(0;1) dx = k_{\text{лм2}}^{-1} \int_{\Pi}^{\infty} N_x(0;1) dx,$$

где величина  $\Pi_3$  задается (перебирается в заданном диапазоне) как независимая переменная. В случае получения решения  $\Pi < 0$  оно уточняется как  $\Pi = 0$ . Зависимость величины  $k_{\text{лм2}}$  от величины порога  $\Pi$  на данном этапе не учитывалась. При этом величина  $k_{\text{лм2}}^{-1}$  определялась на основании предварительных расчетов в обеспечение оптимизации величины  $\Pi$ . При определении величины  $k_{\text{лм2}}^{-1}$  также не учитывалось благоприятное влияние на размер строба величины корреляции между ошибками оценивания дальности и показателя наклона спектра. Полученное на данной итерации значение величины  $Q$  сравнивается с его использованной при расчетах экспертной оценкой  $Q_0$ . При  $Q > Q_0$  (или  $Q < Q_0$ ) проводится вторая итерация, предусматривающая повторение указанных выше расчетов при величине экспертной оценки порогового отношения сигнал/шум  $Q_1 > Q_0$  (соответственно  $Q_1 < Q_0$ ), после чего осуществляется сравнение рассчитанной на второй итерации величины  $Q_2$  с  $Q_1$  и т.д. Итерационный процесс расчетов заканчивается при выполнении на очередной ( $r$ -й) итерации условия  $Q_r \approx Q_{r-1}$ . Полученное при этом значение  $Q_r$  является искомым результатов расчета порогового сигнала.

При проведении указанных выше расчетов установлено, что при практически интересных соотношениях между интервалом трассового обнаружения и интервалом некогерентного накопления и задаваемых статистических характеристиках обнаружения трасс оптимальные значения порогов составляют  $\Pi_3 = 1,5-1,8$  и  $\Pi = 0$ , а значение поправочного коэффициента -  $k_{\text{лм1}} \approx 1,5$ . Тогда, например, при  $N = 10$ ,  $P_{\text{обн}\Sigma} = 0,9$  и  $P_{\text{лм}\Sigma} = 10^{-5}$  имеем  $k_{\text{лм1}} = 1,55$ ,  $k_{\text{лм2}} = 10$  и  $Q = 0$  дБ, что на 3 дБ меньше, чем в аналогичных условиях при трассовом анализе в режиме ШП с традиционным одномерным (только по пеленгу) стробированием.

При практической реализации предлагаемого варианта алгоритма трассового обнаружения следует учитывать, что для настройки параметров этого алгоритма необходимо априорное знание фактического отношения сигнал/шум  $Q$ . В реальных условиях, т.е. при неизвестном значении  $Q$ , процедура обнаружения трасс может быть реализована многоальтернативной (многоканальной по параметру  $Q$ ) с перебором значений  $Q$  в интервале от -3 дБ до +3-5 дБ с шагом 1-2 дБ.

При работе в реальных условиях достижение указанных точностей оценивания параметров сигнала и порогового отношения сигнал/шум на индикаторе возможно в той степени, в которой рассмотренные в статье модели соответствуют спектрам реальных сигналов. В этом плане результаты настоящей статьи иллюстрируют возможные пределы эффективности решения рассмотренных задач. С другой стороны, возможными ресурсами дальнейшего повышения эффективности трассового обнаружения являются учет корреляции ошибок оценивания дистанции и показателя наклона спектра и реализация (при развитой по вертикали антенне) дополнительного оценивания глубины погружения источника сигнала и четырехмерное стробирование.

\* \* \*

Предложен алгоритм одновременного оценивания дистанции и показателя наклона спектра сигнала шумоизлучения, основанный на реализации в каждом направлении наблюдения двумерной гребенки фильтров Экарта, “настроенных” на возможные сочетания альтернатив двух оцениваемых параметров сигнала (дистанции и показателя наклона спектра). В случае использования развитой по вертикали антенны указанный алгоритм предусматривает реализацию трехмерной гребенки фильтров Экарта, “настроенных” на сочетания альтернатив трех оцениваемых параметров (третьим параметром является глубина погружения).

Согласно результатам проведенного моделирования предлагаемого алгоритма (при выполнении условия адекватности рассмотренных моделей спектра сигнала реальным спектром) достигаемые при отношениях сигнал/шум на индикаторе около 0 дБ относительные стандартные ошибки оценивания дистанции находятся в основном в диапазоне значений 7-20 %, а стандарты ошибки оценивания показателя наклона спектра сигнала – 0,12-0,30 дБ/окт.

Показано, что при достигаемых погрешностях оценивания дистанции и показателя наклона спектра сигнала реализация алгоритма трассового обнаружения с трехмерным стробированием (по пеленгу, дистанции и показателю наклона спектра) обеспечивает пороговое отношение сигнал/шум на индикаторе 0 дБ, что на 3 дБ меньше порогового отношения сигнал/шум обеспечиваемого при традиционном трассовом обнаружении с одномерным (только по пеленгу) стробированием.

Ресурсами дополнительного снижения порогового отношения сигнал/шум являются учет корреляции ошибок оценивания параметров сигнала (цели), а также (в случае использования развитой по вертикали антенны) реализация дополнительного оценивания глубины погружения цели и четырехмерного стробирования при трассовом обнаружении.

#### Литература

1. Демиденко В.А. Перельмутер Ю.С. Спектральный метод оценки дистанции // Гидроакустика. Науч.-техн.сб. ОАО ”Концерн “Океанприбор”. 2006. Вып.6. С.51-59.
2. Бородин В.В. Потенциальная точность определения положения источника звука в волноводе // Вопросы судостроения. Сер. Акустика. 1983. Вып.16. С.88-103.
3. Голубев А.Г., Мисюченко И.Л. Способ измерения дальности до источника шумоизлучения. Пат. РФ № 2128848 от 10.09.97.

Статья поступила в редакцию 09.12.2008 г.