

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПРИМЕНИМОСТИ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ
ФУНКЦИИ ШИРОКОПОЛОСНОГО МНОГОЛУЧЕВОГО
СИГНАЛА ДЛЯ ОЦЕНКИ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА

© 2017 г. А. И. Машошин

АО «Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"
197046 Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская 30
e-mail: aimashoshin@mail.ru

Поступила в редакцию 12.02.2016 г.

Изучена зависимость количества максимумов в корреляционной функции широкополосного сигнала, параметры которых связаны с координатами источника, от гидроакустических условий, параметров приемного тракта и отношения сигнал/помеха. Рассмотрение проведено на основе теоретического анализа и математического моделирования.

Ключевые слова: гидроакустика, многолучевой канал, корреляционная функция, координаты источника.

DOI: 10.7868/S0320791917030091

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных практических задач гидроакустики является определение координат источника звука в пассивном режиме работы гидроакустического средства. Для решения этой задачи предложено большое число методов и алгоритмов. Один из этих методов базируется на использовании корреляционной функции (КФ) широкополосного многолучевого сигнала источника звука, принимаемого шумопеленгаторной станцией, для определения его дальности и глубины [1–6]. Информация о дальности и глубине источника звука в КФ содержится в расположении на оси задержек узкополосных максимумов, обусловленных интерференцией коррелированных сигналов источника, пришедших по различным лучам. Каждой паре лучей в КФ соответствует один максимум с шириной, равной обратной величине эффективной полосы частот сигнала в точке приема, и положением, равным разности времен распространения сигнала по интерферирующим лучам. На рис. 1 в качестве иллюстрации приведена КФ четырехлучевого сигнала, рассчитанная для условий сплошной акустической освещенности в мелком море по лучевой программе, описанной в работе [7].

Определение координат источника сигнала по информации, содержащейся в КФ, состоит в решении относительно дальности R и глубины H системы уравнений вида

$$\begin{aligned} |T_i(R, H) - T_j(R, H)| = \hat{\tau}_{i,j}, \quad i = 1, \dots, N-1; \\ j = i+1, \dots, N, \end{aligned} \quad (1)$$

где N – количество лучей, по которым распространяется сигнал источника; $T_i(R, H)$ – время распространения сигнала по i -му лучу при условии нахождения источника в точке с координатами (R, H) , которое рассчитывается по лучевой программе для текущих гидроакустических условий; $\hat{\tau}_{i,j}$ – положение максимума в КФ, обусловленного интерференцией сигналов, пришедших по i -му и j -му лучам.

Алгоритмы решения уравнения (1) весьма нетривиальны (см., например, [8]). Но в данной работе мы их рассматривать не будем, а ограничимся анализом физических условий, при которых уравнение (1) имеет решение. Необходимым математическим условием наличия решения уравнения (1) (в общем случае многозначного) является обнаружение в КФ на выходе шумопеленгатора хотя бы одного узкополосного максимума. Однако в большинстве практических случаев для получения оценки координат источника с приемлемой точностью обнаружения в КФ одного узкополосного максимума недостаточно. Можно постулировать, что точность решения уравнения (1) будет тем выше, чем большее количество максимумов будет обнаружено в КФ.

Целью работы является исследование зависимости количества максимумов, которые могут быть обнаружены в КФ, от гидроакустических условий, параметров приемного тракта и отношения сигнал/помеха (ОСП).

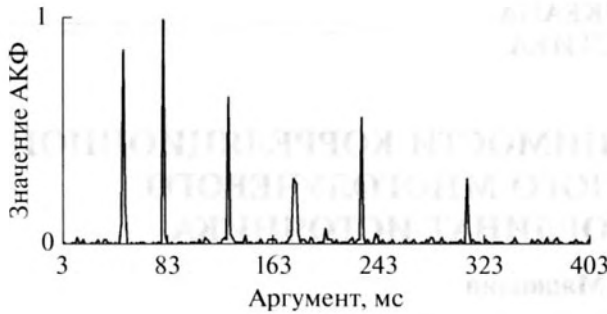


Рис. 1. Автокорреляционная функция широкополосного многолучевого сигнала (полоса частот сигнала 1 кГц, число сигнальных лучей 4, входное ОСП 20 дБ, длительность реализации 1 с, число накоплений КФ 10).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Возможность обнаружения в КФ локального максимума, обусловленного интерференцией двух коррелированных сигналов, определяется выходным ОСП, которое применительно к рассматриваемой задаче определяется как [9]

$$Q_{\text{КФ},ij} = \frac{M[\tilde{K}(\tau_{i,j})] - M[\tilde{K}(\tau_{\Phi,i,j})]}{\sigma[\tilde{K}(\tau_{\Phi,i,j})]}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{КФ},ij}$ – выходное ОСП для локального максимума в КФ, обусловленного интерференцией i -го и j -го сигналов; $\tau_{i,j}$ – положение данного макси-

мум, равное абсолютной величине относительного запаздывания i -го и j -го сигналов; $M[\tilde{K}(\tau_{i,j})]$ – математическое ожидание (МО) этого максимума; $M[\tilde{K}(\tau_{\Phi,i,j})]$, $\sigma^2[\tilde{K}(\tau_{\Phi,i,j})]$ – МО и дисперсия фоновой части КФ в окрестности локального максимума.

На практике для определения координат источника рассматриваемым методом применяются два алгоритма вычисления КФ широкополосного сигнала. Одним из них является вычисление взаимной корреляционной функции (ВКФ) сигналов на выходе двух сформированных в приемном тракте пространственных каналов (ПК), одинаково ориентированных на источник сигнала в горизонтальном направлении. В вертикальном направлении ПК ориентированы на максимумы пространственного спектра принимаемого сигнала. Другой алгоритм – вычисление автокорреляционной функции (АКФ) сигнала на выходе одного ПК. Этот алгоритм применяется либо когда в приемном тракте формируется единственный ПК в вертикальной плоскости (например, в случае использования горизонтальной линейной антенны), либо когда пространственный спектр сигнала имеет один максимум.

Согласно работе [9] выходное ОСП (при условии применения оптимального частотного фильтра) определяется в виде:

– при использовании ВКФ

$$Q_{\text{ВКФ},ij} = \left[N_{\text{ВКФ}} T_{\text{ВКФ}} \int_{f_n}^{f_b} \frac{r_{ij}^2(f) [S_{i,1}(f)S_{j,2}(f) + S_{i,2}(f)S_{j,1}(f)]}{[S_{s_1}(f) + S_{n_1}(f)][S_{s_2}(f) + S_{n_2}(f)] + [S_{s_{12}}(f) + S_{n_{12}}(f)]^2} df \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{ВКФ},ij}$ – выходное ОСП для локального максимума, обусловленного интерференцией сигналов, пришедших по i -му и j -му лучам; $T_{\text{ВКФ}}$ – длительность реализации сигнала, используемая для вычисления ВКФ; $N_{\text{ВКФ}}$ – количество осредняемых реализаций ВКФ; f_n, f_b – нижняя и верхняя частоты диапазона частот, в котором вычисляется ВКФ; $S_{s_k}(f)$, $S_{n_k}(f)$ – суммарные спектры соответственно сигнала и помехи на выходе k -го вертикального ПК; $S_{s_{12}}(f)$, $S_{n_{12}}(f)$ – взаимные спектры соответственно сигнала и помехи на выходе 1-го и 2-го вертикальных ПК; $S_{i,k}(f)$ – энергетический спектр сигнала, пришедшего по i -му лучу, на выходе k -го вертикального ПК; $r_{ij}(f)$ – коэффициент когерентности сигналов, пришедших по i -му и j -му лучам, вычисляемый по формуле [10]

$$r_{ij}(f) = \frac{|G_{i,1}^*(f)G_{j,2}(f)|}{|G_{i,1}(f)||G_{j,2}(f)|}, \quad (4)$$

в которой $G_{i,k}(f)$ – комплексный спектр сигнала, пришедшего по i -му лучу, на выходе k -го вертикального ПК;

– при использовании АКФ

$$Q_{\text{АКФ},ij} = \left[2N_{\text{АКФ}} T_{\text{АКФ}} \int_{f_n}^{f_b} \frac{r_{ij}^2(f) S_i(f) S_j(f)}{[S_s(f) + S_n(f)]^2} df \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

где $Q_{\text{АКФ},ij}$ – выходное ОСП для локального максимума, обусловленного интерференцией сигналов, пришедших по i -му и j -му лучам; $T_{\text{АКФ}}$ – длительность реализации сигнала, используемой для вычисления АКФ; $N_{\text{АКФ}}$ – количество осредняемых реализаций АКФ; $S_s(f)$, $S_n(f)$ – суммарные спектры соответственно сигнала и помехи на выходе используемого ПК; $S_i(f)$ – энергетический спектр сигнала, пришедшего по i -му лучу, на выходе используемого ПК.

Как видно, знаменатели формул (3) и (5) формируются как помехой, так и сигналом. Из этого следует, что помехоустойчивость обнаружения максимумов в КФ тем выше, чем большую долю энергии суммарного сигнала составляет энергия интерферирующих сигналов. Это имеет место, когда количество лучей, достигших приемной антенны, невелико либо когда имеется пара (или несколько пар) лучей, значительно превосходящих по энергии остальные лучи.

Дальнейшие рассуждения будем вести применительно к обнаружению локальных максимумов в АКФ, поскольку этот вариант имеет более широкое практическое применение и более прост для анализа. Для удобства анализа предположим независимость спектров сигнала и помехи от частоты. В результате получим

$$Q_{\text{АКФ},j} = \left[2N_{\text{АКФ}} \Delta f T_{\text{АКФ}} \frac{r_{ij}^2 S_i S_j}{(S_s + S_n)^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

где $\Delta f = f_n - f_n$ – полоса сигнала, используемая для вычисления АКФ.

Введем обозначения: $K_i = S_i/S_s$ – относительная мощность сигнала, пришедшего по i -му лучу, в суммарном сигнале на выходе рассматриваемого ПК; $q = S_s/S_n$ – отношение мощности суммарного сигнала к мощности суммарной помехи, которое будем называть входным ОСП. С учетом этих обозначений формула (6) примет вид

$$Q_{\text{АКФ},i,j} = \sqrt{2N_{\text{АКФ}} \Delta f T_{\text{АКФ}} r_{ij}^2 K_i K_j} \frac{q}{1+q}. \quad (7)$$

Условием обнаружения максимума в АКФ, являющегося следствием интерференции сигналов, пришедших по i -му и j -му лучам, является выполнение неравенства

$$Q_{\text{АКФ},i,j} = \sqrt{2N_{\text{АКФ}} \Delta f T_{\text{АКФ}} r_{ij}^2 K_i K_j} \frac{q}{1+q} > Q_{\text{пор}}, \quad (8)$$

где $Q_{\text{пор}}$ – пороговое значение выходного ОСП, соответствующее заданным величинам вероятности правильного обнаружения локального максимума и ложной тревоги. Из формулы (8) можно определить условие обнаружения локального максимума в АКФ:

$$r_{ij}^2 K_i K_j > \frac{Q_{\text{пор}}^2 (1+q)^2}{2N_{\text{АКФ}} \Delta f T_{\text{АКФ}} q^2}, \quad (9)$$

так что для обнаружения локального максимума в АКФ произведение относительных мощностей интерферирующих сигналов с учетом величины их когерентности должно превышать значение выражения, стоящего в правой части неравенства.

Поскольку значение левой части формулы (9) может изменяться в широких пределах в зависимости от гидроакустических условий и взаимного расположения источника и приемника, рассмот-

рим предельный случай. Предположим, что суммарный сигнал формируется N_{rays} сигналами одинаковой интенсивности, пришедшими по N_{rays} лучам. Тогда для каждой пары этих лучей $K_i K_j = N_{\text{rays}}^{-2}$, и выражение (9) принимает вид

$$r_{ij}^2 N_{\text{rays}}^{-2} > \frac{Q_{\text{пор}}^2 (1+q)^2}{2N_{\text{АКФ}} \Delta f T_{\text{АКФ}} q^2}. \quad (10)$$

Учитывая, что все параметры в первом сомножителе в правой части формулы (10) для конкретного приемного тракта являются константами, ее можно рассматривать как зависимость в предельном случае порогового входного ОСП для обнаружения максимумов в АКФ от количества лучей, формирующих суммарный сигнал, и их взаимной когерентности. Эта зависимость при типовых значениях параметров приемного тракта $\Delta f = 1$ кГц, $T_{\text{АКФ}} = 1$ с, $N_{\text{АКФ}} = 10$, $Q_{\text{пор}} = 5$ приведена на рис. 2. Из рис. 2 следует, что при изменении числа лучей от 2 до 10 и их взаимной когерентности от 0.2 до 1.0 пороговое входное ОСП изменяется в интервале от -10 до 10 дБ. При этом входное пороговое ОСП для обнаружения сигнала в тех же условиях составляет -14 дБ. Другими словами, выделение максимумов в КФ на дальности обнаружения источника сигнала является проблематичным. Заметим, что потенциальное число максимумов N_{max} , которые могут быть обнаружены в КФ, связано с числом лучей N_{rays} , формирующих сигнал, известной формулой

$$N_{\text{max}} = \frac{N_{\text{rays}} (N_{\text{rays}} - 1)}{2}. \quad (11)$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Целью моделирования являлось определение количества максимумов, которые могут быть обнаружены в КФ в различных гидроакустических и помехосигнальных условиях.

Моделирование проводилось по следующей методике.

1) В качестве исходных данных моделирования задавались параметры:

– Два типа гидроакустических условий (рис. 3) – сплошная акустическая освещенность (САО) в мелком (200 м) море (соответствующая положительной рефракции скорости звука) и дальние зоны акустической освещенности (ДЗАО) в глубоком (4000 м) море при волнении поверхности моря 3 балла. Названные условия выбраны в связи с тем, что им соответствуют два крайних (с точки зрения влияния границ волновода на характеристики сигнала) типа распространения сигнала: сильное влияние в первом случае и слабое – во втором.

– Заглубление источника 7 и 50 м, заглубление приемной антенны 50 м.



Рис. 2. Зависимость порогового входного ОСП для выделения максимумов в КФ от количества лучей, формирующих сигнал. Параметром графика является коэффициент когерентности сигналов, пришедших по каждой паре лучей. Справа указаны значения коэффициента когерентности сигналов для каждой кривой.

— Расстояние между источником и приемником изменялось с шагом 0.5 км от 1 км до дистанции, на которой входное ОСП уменьшалось до -20 дБ.

— Коэффициент когерентности сигнальных лучей 0.5. Поскольку вопрос когерентности широкополосных сигналов источника, распространяющихся по разным лучам, в литературе практически не освещен, для моделирования выбрано среднее значение коэффициента когерентности из диапазона его возможных значений. Следует признать, что неучет зависимости когерентности сигналов, распространяющихся по разным лучам, от гидроакустических условий и взаимного расположения источника и приемника снижает ценность результатов настоящего исследования.

— Параметры приемного тракта: вертикально расположенная плоская антенна шириной 3 м и высотой 3 м, состоящая из $21 \times 21 = 441$ элемента, ориентированная нормалью в направлении на источник сигнала в горизонтальной плоскости. Рабочий диапазон частот 4–5 кГц, прием осуществляется на веер пространственных каналов в вертикальной плоскости, оси соседних ПК отстоят на 3° друг от друга в секторе $\pm 20^\circ$.

— Расчет осуществлялся для трех значений отношения уровня сигнала в точке излучения к уровню суммарной помехи на входе антенны — 30, 40 и 50 дБ.

— Пороговое значение выходного ОСП для обнаружения максимумов в АКФ и ВКФ 7 дБ.

2) Для каждого из заданных взаимных расположений источника и приемной антенны рассчитывались:

— по формуле (5) выходное ОСП в АКФ для каждой пары акустических лучей, попавших в вертикальный раскрыв антенны, на выходе ПК с наибольшим из всех ПК входным ОСП;

— по формуле (3) выходное ОСП в ВКФ для каждой пары акустических лучей, попавших в вертикальный раскрыв антенны, на выходе двух ПК с наибольшими входными ОСП.

При этом использовалась лучевая программа расчета акустического поля сигнала, описанная в работе [7] и учитывающая вертикальное распределение скорости звука, частотно-угловые зависимости коэффициентов отражения от границ волновода и частотную зависимость коэффициента пространственного затухания.

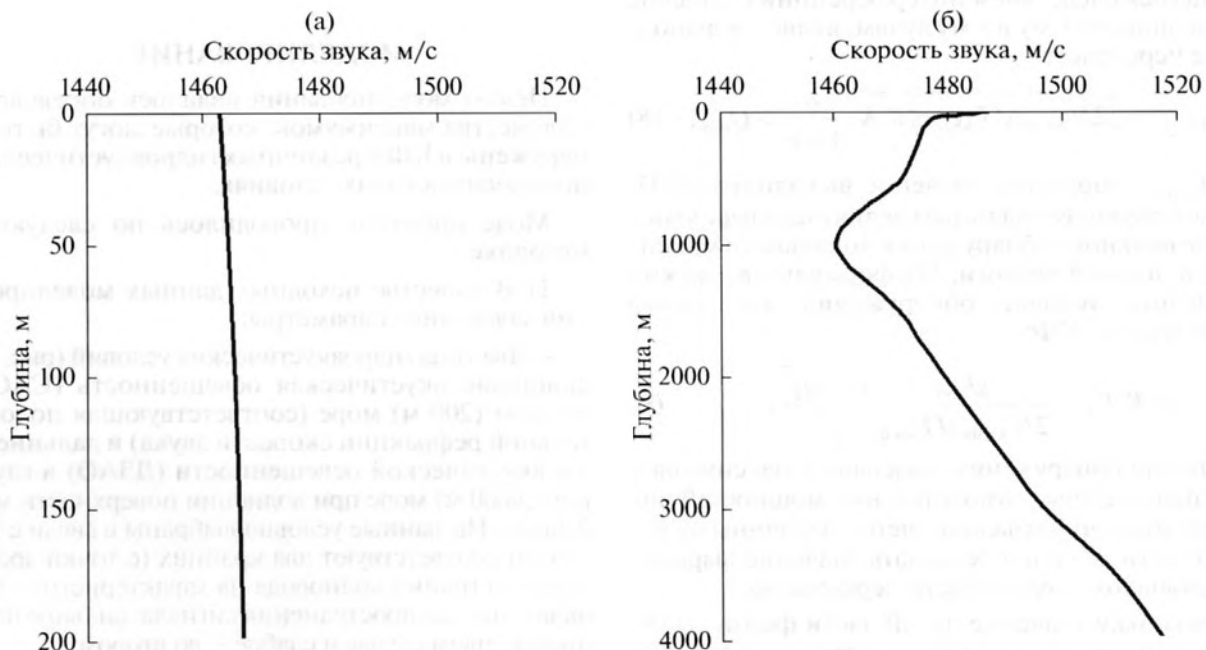


Рис. 3. Вертикальные распределения скорости звука, для которых проводилось моделирование: (а) мелкое море, (б) глубокое море.

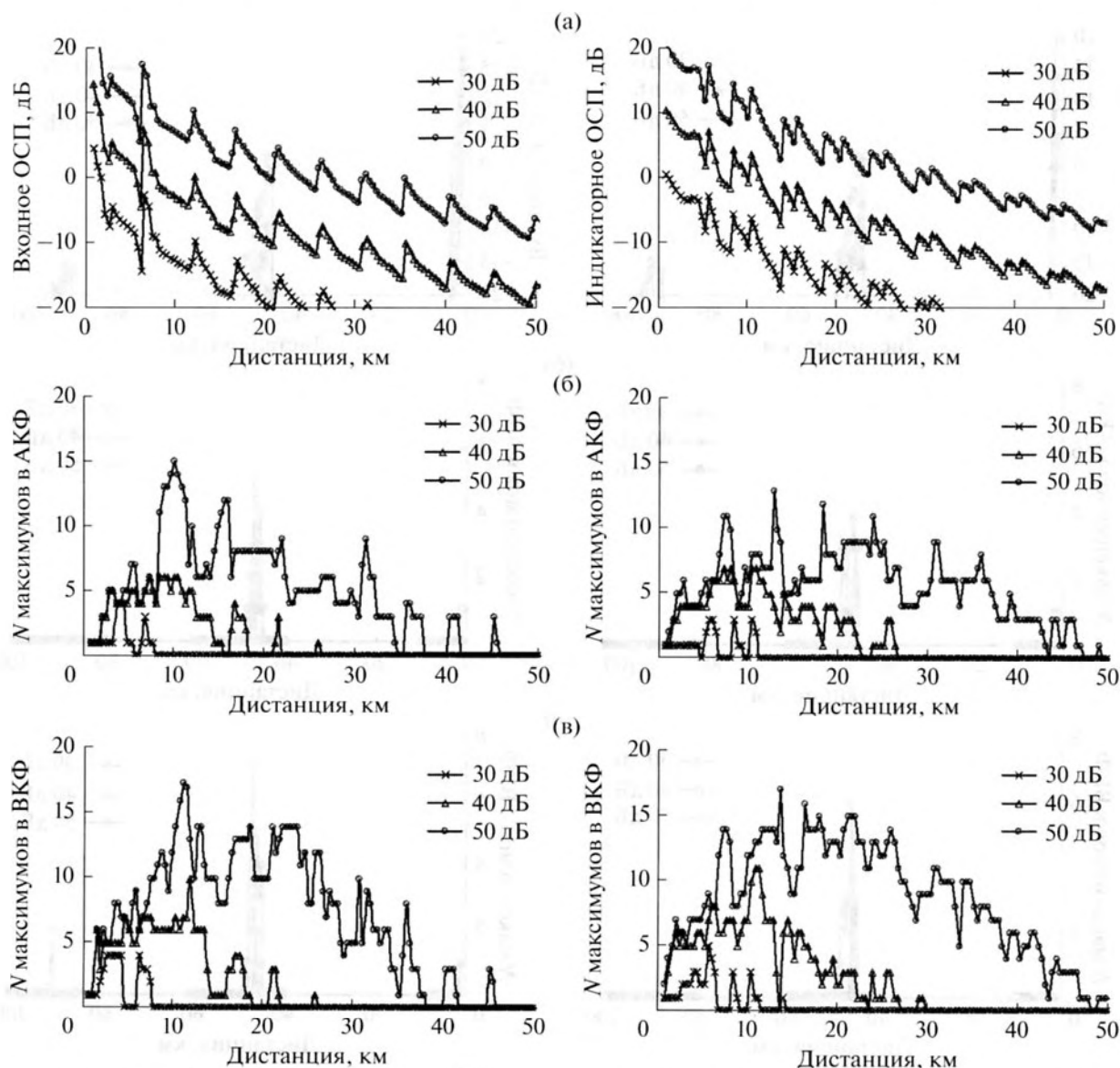


Рис. 4. Результаты моделирования для условий САО в мелком (200 м) море. Параметром графика является отношение мощности сигнала в полосе частот измерения КФ в точке излучения к мощности помехи на входе антенны в той же полосе частот. Левый столбец соответствует глубине источника 7 м, правый – 50 м. Глубина приемника в обоих случаях 50 м. (а) Входное ОСП в полосе частот вычисления КФ; (б) количество максимумов, обнаруженных в АКФ; (в) количество максимумов, обнаруженных в ВКФ.

3) Путем сравнения рассчитанных для каждой пары лучей выходных ОСП с заданным пороговым значением определялось количество обнаруженных интерференционных максимумов в АКФ и ВКФ и их параметры (положение и ОСП).

4) Положения всех максимумов, обнаруженных в АКФ (ВКФ), сравнивались между собой, и, если находились совпадающие с точностью до разрешения АКФ (ВКФ), то один из них исключался, а к ОСП другого добавлялось ОСП исключенного максимума.

5) Полученные результаты использовались для построения графиков.

Результаты моделирования приведены на рис. 4–6. На рис. 4 и 5 для двух вариантов заглубления источника сигнала изображены зависимости входного ОСП и количества лучей, обнаруженных в АКФ и ВКФ, от расстояния между источником сигнала и приемной антенной. Рисунок 4 соответствует условиям САО в мелком море, рисунок 5 – условиям ДЗАО в глубоком море.

На рис. 6 изображена зависимость наибольшего количества максимумов, обнаруженных в АКФ и ВКФ при большом входном ОСП, в зависимости от ширины характеристики направленности (ХН) приемной антенны в вертикальной плоскости. Па-

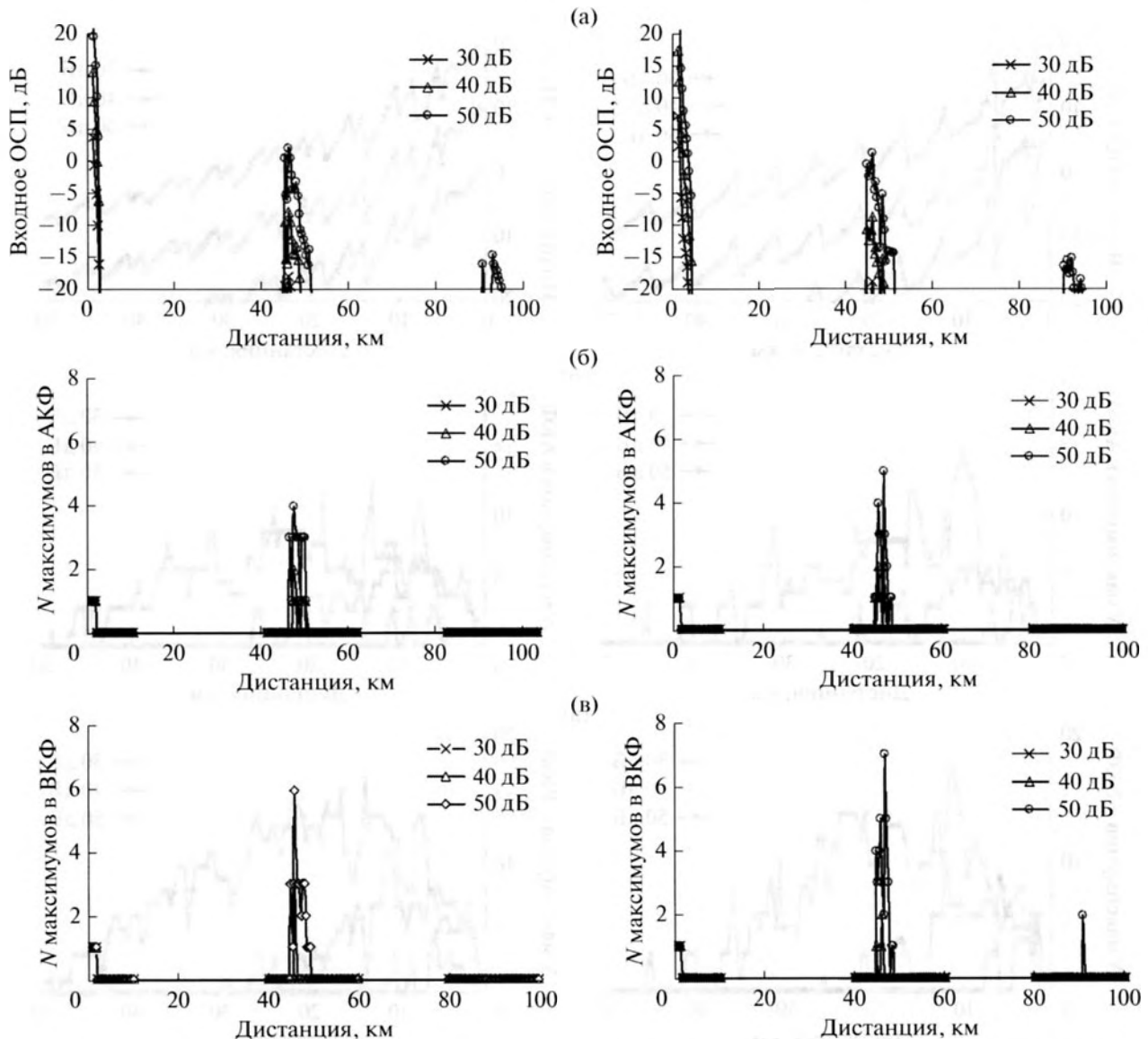


Рис. 5. Результаты моделирования для условий ДЗАО в глубоком (4000 м) море. Параметром графика является отношение мощности сигнала в полосе частот измерения КФ в точке излучения к мощности помехи на входе антенны в той же полосе частот. Левый столбец соответствует глубине источника 7 м, правый – 50 м. Глубина приемника в обоих случаях – 50 м. (а) Входное ОСП в полосе частот вычисления КФ; (б) количество максимумов, обнаруженных в АКФ; (в) количество максимумов, обнаруженных в ВКФ.

раметром графика является заглубление источника. Глубина приемника в обоих случаях 50 м.

Из рассмотрения рис. 4–6 следует:

1) при выбранных параметрах обработки максимумы в АКФ и ВКФ обнаруживаются, начиная со значения входного ОСП в полосе вычисления КФ в среднем –5 дБ;

2) в условиях САО в мелком море:

– количество обнаруженных максимумов при большом входном ОСП может достигать 15 в АКФ и 17 в ВКФ, что обусловлено большим числом сигнальных лучей, попадающих в раскрыв приемной антенны;

– при приближении источника к приемнику количество обнаруженных максимумов в АКФ и ВКФ сначала монотонно возрастает, а начиная с дистанции примерно 10 км монотонно убывает;

3) в условиях ДЗАО в глубоком море:

– при нахождении источника в 1-й ДЗАО количество обнаруженных максимумов в АКФ и ВКФ не превышает 7, что объясняется существенно меньшим числом сигнальных лучей, попадающих в раскрыв приемной антенны в условиях ДЗАО по сравнению с условиями САО;

– при нахождении источника в ближней зоне акустической освещенности в АКФ и ВКФ, как правило, обнаруживается единственный максимум.

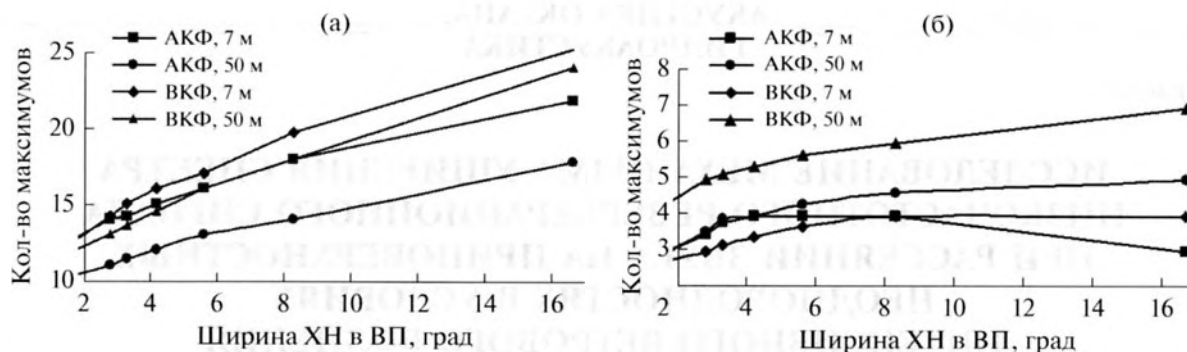


Рис. 6. Наибольшее количество максимумов, обнаруженных в АКФ и ВКФ при большом входном ОСП, в зависимости от ширины характеристики направленности приемной антенны в вертикальной плоскости. Параметром графика является заглублиение источника. Глубина приемника в обоих случаях 50 м. (а) Условия САО в мелком море; (б) условия ДЗАО в глубоком море.

4) В условиях САО в мелком море при расширении ХН приемной антенны количество обнаруженных максимумов в АКФ и ВКФ растет, что обусловлено увеличением количества сигнальных лучей, попадающих в ХН. Градиент роста количества максимумов для ВКФ больше по сравнению с АКФ;

5) В условиях ДЗАО в глубоком море при расширении ХН приемной антенны количество обнаруженных максимумов в АКФ и ВКФ при заглублиении источника на 50 м медленно растет, что обусловлено увеличением количества сигнальных лучей, попадающих в ХН антенны, а при заглублиении источника на 7 м сначала незначительно растет, а затем остается постоянным либо незначительно падает. Данный факт обусловлен тем, что в условиях ДЗАО количество лучей, попадающих в ХН антенны, слабо зависит от ее ширины, но при этом с ростом ширины ХН возрастает уровень помехи на выходе ХН и, как следствие, входное ОСП уменьшается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована зависимость количества интерференционных максимумов, которые могут быть обнаружены в КФ, от гидроакустических условий, параметров приемного тракта и входного ОСП. Одним из важных факторов, влияющих на помехоустойчивость обнаружения интерференционных максимумов в КФ, является зависимость величины когерентности сигналов источника, распространяющихся по разным лучам, от гидроакустических условий и взаимного расположения источника и приемника. Однако, поскольку в литературе данный вопрос практически не освещен, проведенное исследование эту зависимость не учитывает. Данный пробел планируется восполнить в последующих работах.

Показано, что помехоустойчивость обнаружения интерференционных максимумов в КФ всегда ниже помехоустойчивости обнаружения самого сигнала, ввиду чего выделение максимумов

в КФ на дальности обнаружения сигнала является проблематичным.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15-08-02928-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов Е.Ф., Фокин В.Н., Шаронов Г.А. Исследование параметров интерференционной модуляции широкополосного звука в глубоком океане // Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 5. С. 902–907.
2. Лазарев В.А., Орлов Е.Ф., Фокин В.Н., Шаронов Г.А. Частотная зависимость параметров интерференционной модуляции широкополосного звука в мелком море // Акуст. журн. 1989. Т. 35 № 4. С. 685–688.
3. Hassab I.C. Contact localization and motion analysis in the ocean environment: a perspective // IEEE J. Oceanic Engineering. 1983. V. OE-8. № 3. P. 136–147.
4. Quazi A.H., Lerro D.T. Passive localization using time-delay estimates with sensor positional errors // J. Acoust. Soc. Am. 1985. V. 78. № 5. P. 1664–1670.
5. Moghaddam P.H., Amindavar H. A new algorithm for multipath time delay estimation in low SNR using MLE method / Proc. IEEE Int. Symp. Underwater Technol. 1998. P. 35–38.
6. Worthmann B.M., Song H.C., Dowling D.R. High frequency source localization in a shallow ocean sound channel using frequency difference matched field processing // J. Acoust. Soc. Am. 2015. V. 138. P. 3549.
7. Марасёв С.В., Машошин А.И. Задачи, решаемые системой гидроакустических расчетов // Морская радиоэлектроника. 2015. № 2(52). С. 40–45.
8. Корецкая А.С., Мельканович В.С. Определение координат источника гидроакустического сигнала с использованием технологии индексного поиска // Гидроакустика. 2015. № 1(21). С. 68–75.
9. Машошин А.И. Помехоустойчивость выделения максимумов в корреляционной функции широкополосного шумового сигнала морского объекта, обусловленных многолучевым распространением сигнала в водной среде // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 6. С. 823–829.
10. Бендат Дж., Пирсол А. Применения корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983.