УДК 534.883

© *А. Д. Консон, А. А. Волкова*
ОАО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург
Wolkova.AA@yandex.ru, adKonson@gmail.com

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ РАССТОЯНИЯ МЕТОДОМ «ОПТИМАЛЬНЫХ ЧАСТОТ» В ПАССИВНОЙ ГИДРОЛОКАЦИИ

Получено аналитическое описание традиционного метода «оптимальных частот» для оценки расстояния до шумящего в море объекта. Анализ методической погрешности оценки расстояния позволил получить выражение для составляющей погрешности, обусловленной отсутствием данных о наклоне спектра широкополосного сигнала. Показано, что предельной погрешностью оценки расстояния при неизвестном наклоне спектра сигнала, можно считать значение около шести процентов. Показано, что наряду с традиционной реализацией метода на основании выбора центральной частоты широкополосного фильтра возможна усовершенствованная реализация метода оценки расстояния с одновременной оценкой наклона спектра широкополосного сигнала путем оптимизации вида амплитудно-частотной характеристики фильтра. Анализ экстремума полученной функции показал его слабо выраженный характер. Практическая значимость каждого из вариантов по критерию минимальной погрешности оценки расстояния может быть определена после дополнительных теоретических и экспериментальных исследований, направленных на выявление и сравнение помехоустойчивости методов в зависимости от параметров источника сигнала, параметров среды распространения сигнала и параметров приемного тракта гидролокатора.

Ключевые слова: гидроакустика, шумопеленгование, оценка расстояния.

A. D. Konson, A. A. Volkova
JSC «Concern «Oceanpribor», St.-Petersburg, Russia
Wolkova.AA@yandex.ru

POTENTIALITIES OF DISTANCE ESTIMATION BY METHOD OF «OPTIMAL FREQUENCIES» IN PASSIVE SONAR LOCALIZATION

Analytical description of traditional method of «optimal frequencies» for estimation of distance to noise emitting object in the sea is received. Analysis of method error of distance estimation has allowed to receive expression for the error component caused by lack of data about inclination of broadband signal spectrum. It is shown that at unknown inclination of signal spectrum, limiting error of distance estimation can be taken as about six percent. It is shown that along with traditional realization of the method, based on choice of the central frequency of broadband filter, advanced realization of distance estimation method with simultaneous estimation of inclination of broadband signal spectrum by optimization of the type of filter amplitude-frequency characteristic is possible. Analysis of received function extremum has shown its weakly expressed pattern. Practical importance of each variant by criterion of minimum error of distance estimation can be defined after additional theoretical and experimental research directed at revealing and comparison of methods noise stability depending on signal source parameters, parameters of signal propagation medium and parameters of sonar receiving subsystem.

Key words: hydrolocation, passive listening, distance estimation.

Состояние вопроса. Если сравнивать средства пассивной гидролокации шумящих объектов относительно средств активной гидролокации тех же объектов, то они имеют ряд практически важных преимуществ. К ним, как правило, можно отнести бóльшую дальность обнаружения, низкое энергопотребление и скрытность наблюдения, что критично для некоторых

видов носителей. Однако существенным недостатком средств пассивной гидролокации является отсутствие возможности оценить расстояние до цели при реализации классической процедуры обнаружения шумящего объекта [1]. Для решения этой задачи в пассивной гидролокации используют дополнительные процедуры.

К наиболее распространенным следует отнести процедуры, использующие динамику изменения пеленга на цель при маневрировании наблюдателя [2]. При этом решается задача оптимизации траектории наблюдателя для обеспечения требуемого качества оценок координат и параметров движения цели, которая представляет собой поиск параметров движения наблюдателя, обеспечивающих экстремум функции от информационной матрицы Фишера. Как эмпирически установлено для получения приемлемых на практике результатов в оценках расстояния до объекта, курса и скорости движения объекта требуемое время наблюдения имеет порядок величин, примерно равный в минутах расстоянию до объекта в километрах. Отсюда нетрудно оценить, что в океанических условиях, когда существуют дальние зоны обнаружения, времени существования движущегося объекта в зоне освещенности не достаточно для того, чтобы качественно решить задачу определения расстояния и элементов движения цели. Задача таким способом может быть решена только в ближней зоне освещенности на расстояниях в десяток километров.

Помимо названного способа определения расстояния в последнее время получает практическое развитие метод, основанный на измерении кривизны волнового фронта сигнала [3]. Время, необходимое для оценки расстояния, в этом случае незначительно. Однако данный способ дает приемлемые результаты только на расстояниях, составляющих не более сотни длин измерительной базы, состоящей из нескольких акустических антенн. Учитывая допустимые продольные размеры носителя, этот метод работает на тех же небольших расстояниях до цели, что и предыдущий, но результаты можно получить за значительно меньшее время.

В научном и практическом планах длительное время ведется поиск решения задачи для бóльших расстояний, до сотни и более километров. Здесь можно выделить ряд заслуживающих внимания публикаций [4–6]. Общим для них является предложение использовать для решения задачи известное явление — изменение спектральных свойств широкополосного сигнала при его распространении в океанической среде [7].

В упомянутой работе [4] рассмотрен метод, который получил наименование «спектральный». Суть метода состоит в том, что на выходе приемника наблюдают спектр принятого сигнала в широком диапазоне частот (рассмотрена полоса частот от 0.2 до 48 кГц). Затем определяют расстояние до источника путем сравнения наблюдаемого спектра относительно исходного. Очевидно, и это показано в самой работе [4], для реализации такого метода с погрешностью оценки расстояния не более 10 % требуется значение отношения сигнала к помехе не менее 100 в широкой полосе частот. Такие условия делают допустимым практическое применение «спектрального» метода на расстояниях значительно меньше тех, на которых происходит первичное обнаружение широкополосного сигнала с помощью оптимального обнаружителя [8]. Тогда, если брать в рассмотрение реально существующие уровни шумящих объектов, область оцениваемых расстояний может приходиться на ближнюю зону освещенности, то есть в пределах тех же десятков километров [9].

Лучшие условия по требуемому значению отношения сигнала к помехе для практического применения дает, так называемый, «энергетический» метод, который рассмотрен в работе [5]. В данном методе для оценки расстояния используют две оценки мощности сигнала или две оценки отношения сигнала к помехе, полученные на выходах двух широкополосных частотно разнесенных приемных каналов с варьируемой для каждого центральной частотой фильтра. В работе рассмотрена дискриминантная функция по расстоянию, которая формируется двухканальной системой. Показано, что точность оценки расстояния потенциально может расти по мере увеличения разности центральных частот фильтров в двух каналах. Однако это потребует, в свою очередь, роста значения отношения сигнала к помехе, что, соответственно, делает доступным применение «энергетического» метода только с потерей расстояния относительно расстояния первичного обнаружения широкополосного сигнала. Потери эти будут тем выше, чем выше требования по точности оценки расстояния. Но все-таки расстояние для применения этого метода останется больше, чем то, которое возможно для рассмотренных до этого методов.

Потенциально лучшим для применения с момента обнаружения широкополосного сигнала может стать метод «оптимальных частот», суть которого заключается в создании гребенки

широкополосных фильтров с центральными частотами, соответствующими выбранной сетке расстояний. Тогда расстояние может быть определено по фильтру с максимальным значением отношения сигнала к помехе. В работе [6] задача оценивания расстояния в аналогичной постановке рассмотрена с дополнительным включением оценивания наклона исходного спектра широкополосного сигнала. Это дает основание рассчитывать на демпфирование компоненты ошибок оценивания расстояния, обусловленных неточным знанием исходного спектра широкополосного сигнала.

Целью настоящей работы является получить в общем виде путем аналитических исследований формулировку ограничений и условий применения метода «оптимальных частот» для оценивания расстояния до источника широкополосного сигнала с неизвестным наклоном спектра и сопоставить теоретические результаты с результатами экспериментальных исследований.

Основы метода «оптимальных частот». Известно, что в системах пассивной гидролокации амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) фильтра, оптимального по критерию максимума отношения сигнала к помехе, имеет вид [8]:

$$K_{\Phi}(f) = \frac{\sqrt{\Phi_S(f)}}{\Phi_N(f)}, \tag{1}$$

где $\Phi_S(f)$ — спектр мощности сигнала на выходе антенны; $\Phi_N(f)$ — спектр мощности помехи на выходе антенны.

Для спектров мощности сигнала и помехи на выходе антенны можно записать:

$$\Phi_S(f) = S_s f^{-n} r^{-2} \exp[-\beta_0 f^l r] A(r), \tag{2}$$

$$\Phi_N(f) = S_n f^{-m} \gamma_0^{-1} f^{-k}, \tag{3}$$

где S_s — мощность сигнала в источнике излучения (на частоте 1 кГц, в полосе 1 Гц, на расстоянии 1 м от акустического центра источника); S_n — мощность помехи (на частоте 1 кГц, в полосе 1 Гц); $S_s f^{-n}$ — спектральная плотность сигнала в поле; $S_n f^{-m}$ — спектральная плотность помехи в поле; f — частота; r — расстояние до источника; $\beta_0 f^l$ — частотнозависимый коэффициент пространственного затухания; $A(r)$ — коэффициент аномалии; $\gamma(f) = \gamma_0 f^k$ — частотнозависимый коэффициент концентрации приемной аддитивной антенны.

Подставляя в формулу (1) выражения для спектров мощности сигнала и помехи (2) и (3), найдем вид передаточной функции оптимального фильтра:

$$K_{\Phi}(f) = K_0 f^{(m+k)-\frac{n}{2}} \exp[-0.5\beta_0 f^l r], \tag{4}$$

где K_0 — коэффициент пропорциональности; остальные обозначения прежние.

Из равенства $\partial K_{\Phi}/\partial f = 0$ можно найти аналитическое выражение для положения максимума АЧХ фильтра, оптимально настроенного на расстояние r:

$$f_{opt} = \left[\frac{2(m+k)-n}{l\beta_0 r}\right]^{\frac{1}{l}}, \tag{5}$$

где n, m, l, k — показатели степени в функциональных зависимостях от частоты, соответственно, для спектров мощности сигнала и помех, для частотно-зависимого затухания и для коэффициента концентрации; β_0 — коэффициент затухания.

Координата максимума АЧХ фильтра смещается по частотной шкале в направлении меньших значений частоты f с ростом расстояния r. Если предположить, что значения параметров n, m, l, k, β_0 известны, то полученное выражение является однозначной монотонной функцией зависимости максимума АЧХ оптимального фильтра от расстояния до источника шумоизлучения. Отсюда следует, что положение максимума на частотной шкале может быть использовано для оценки расстояния.

Если принять для средних значений $m = k = n = 2$, $l = 3/2$, $\beta_0 = 0.026$, то можно построить график (рис. 1) зависимости (5) положения максимума АЧХ фильтра от расстояния r до шумящего источника. Из графика видно, что каждому значению f_{opt} соответствует единственная,

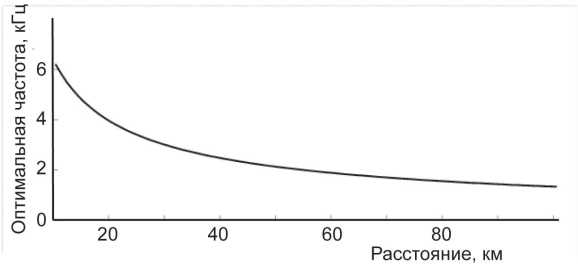

Рис. 1 Положение максимума АЧХ оптимального фильтра в зависимости от расстояния.

не обладающая методической ошибкой, оценка расстояния по методу «оптимальных частот».

Для расчета расстояния можно применять выражение, полученное из (5):

$$r = \frac{2(m+k)-n}{l\beta_0 f_{opt}^{l}}. \qquad (6)$$

Зависимость максимума АЧХ оптимального фильтра от расстояния является однозначной при условии, что значения параметров n, m, l, k, β_0 известны. Однако практически достоверно можно говорить о значении одного параметра k. Значения параметра l лежат в весьма узком интервале относительных изменений и в большинстве практических случаев его можно считать равным 3/2 [8]. О значениях коэффициента затухания в морской воде β_0, вызванного поглощением и рассеянием звуковой энергии, известно достаточно полно: имеются исследования по его определению в различных районах Мирового океана, получены карты районирования по значениям параметра β_0. Параметр m, используемый для аппроксимации спектральной плотности помехи, может быть оценен непосредственно в месте приема. Наиболее неопределенным остается параметр n, характеризующий спектральную плотность сигнала. Согласно известным работам можно принять среднее значение параметра $n \approx 2$, а для среднеквадратического разброса значений параметра n считать $\sigma_n \approx 0.5$ [7].

Если осуществлять оценку расстояния по центральной частоте широкополосного фильтра, то отсутствие данных по наклону спектра образует методическую ошибку. Величину методической ошибки можно определить из (5) и (6) на основе метода линеаризации, полагая, что нам известны среднее значение и дисперсия параметра n:

$$\frac{\sigma_r}{r} = \frac{\sigma_n}{2(m+k)-n}.$$

Если принять для средних значений $m = k = n = 2$, то получим:

$$\frac{\sigma_r}{r} \cong 0.17\sigma_n. \qquad (7)$$

Полученное выражение определяет составляющую методической погрешности оценки расстояния для метода «оптимальных частот», обусловленную отсутствием данных о наклоне спектра широкополосного сигнала.

Оптимизация АЧХ фильтра по двум параметрам: расстоянию и наклону спектра. Исследуем возможность решения задачи оценки расстояния методом «оптимальных частот» путем оптимизации вида АЧХ фильтра по параметрам r и n. Решение задачи в такой постановке укажет на существование принципиальной возможности уменьшения методической погрешности, обусловленной отсутствием достоверных данных о форме спектра широкополосного сигнала.

Процедура решения задачи основана на том, что, если АЧХ фильтра менять согласно (4), управляя изменением параметров r и n, то на момент получения максимума выходного отношения сигнала к помехе, варьируемые значения параметров r и n будут совпадать с истинными. Приведенные ранее выражения дают возможность аналитического решения указанной задачи.

Оценим потери, образующиеся в реальных условиях за счет неоптимального (ошибочного) выбора АЧХ фильтра, обусловленного отклонением принятых значений параметров от истинных. Для этого сравним два отношения сигнала к помехе:

— отношение сигнала к помехе, полученное для идеального случая безошибочного знания расстояния до источника r и параметра сигнала n;

— отношение сигнала к помехе, полученное в условиях наличия погрешности оценки расстояния до источника r и наличия погрешности оценки параметра сигнала n.

В первом случае имеем оптимальный фильтр, настроенный на известное расстояние r для источника с известным спадом спектра n по критерию максимума выходного отношения сигнала к помехе, с передаточной функцией вида (4). Спектры мощности сигнала и помехи на входе фильтра (на выходе антенны) соответствуют (2) и (3).

В оптимальном обнаружителе, состоящем из фильтра с АЧХ вида (4), квадратичного детектора и осреднителя, приращение постоянной составляющей сигнала на выходе равно мощности сигнала [1]:

$$I_S = \int_0^\infty \Phi_S(f) K_\Phi^2(f) \partial f = S_S K_0^2 A(r)\, r^{-2} \int_0^\infty f^{2(m+k)-2n} \exp[-2\beta_0 f^l r] \partial f \,.$$

Далее, интегрируя согласно [10], для постоянной составляющей, пропорциональной мощности полезного сигнала, на выходе обнаружителя получим:

$$I_S = S_S K_0^2 \cdot \frac{A(r)}{r^2} \cdot \frac{\Gamma(\nu)}{l\mu^\nu} \,,$$

где Γ(ν) — гамма-функция; $\nu = \dfrac{2m+2k-2n+1}{l}$; $\mu = 2\beta_0 r$.

Для мощности флуктуаций помехи на выходе квадратичного детектора имеем:

$$\sigma_N^2 = \int_0^\infty \left[\Phi_N(f) K_\Phi^2(f)\right]^2 \partial f = S_N^2 \gamma_0^{-2} K_0^4 \int_0^\infty f^{2(m+k)-2n} \exp(-2\beta_0 f^l r),$$

или после интегрирования:

$$\sigma_N^2 = S_N^2 \gamma_0^{-2} K_0^4 \frac{\Gamma(\nu)}{l\mu^\nu} \,.$$

Отношение сигнала к помехе по напряжению на выходе тракта обнаружения для идеального случая безошибочного знания расстояния до источника *r* и параметра сигнала *n* может быть записано:

$$q_{\max} = \frac{I_S}{\sigma_N} = \frac{S_S}{S_N} \cdot \gamma_0 \cdot \frac{A(r)}{r^2} \cdot \sqrt{\frac{\Gamma(\nu)}{l\mu^\nu}} \,. \tag{8}$$

Далее рассматриваем одноканальную систему, в которой путем изменения значения параметра «расстояние» (r^* = var) и значения параметра «наклон спектра сигнала» (n^* = var), происходит сканирование, в результате которого при приеме сигнала от источника со спадом спектра n, находящегося на расстоянии r, наблюдаем максимум выходного отношения сигнала к помехе.

Аналогично (4) вид АЧХ сканирующих фильтров:

$$K_\Phi(f) = K_0 f^{(m+k)-\frac{n^*}{2}} \exp[-0.5\beta_0 f^l r^*] \,. \tag{9}$$

Спектры мощности сигнала и помехи на входе фильтра (на выходе антенны) соответствуют (2) и (3). Для фильтра с АЧХ вида (9), аналогично предыдущим преобразованиям запишем выражение для приращения постоянной составляющей сигнала на выходе обнаружителя:

$$I_S = \int_0^\infty \Phi_S(f) K_\Phi^2(f) \partial f = S_S K_0^2 A(r)\, r^{-2} \int_0^\infty f^{2(m+k)-(n^*+n)} \exp[-\beta_0 f^l (r^*+r)] \partial f \,.$$

После интегрирования получим:

$$I_S = S_s K_0^2 \cdot \frac{A(r)}{r^2} \cdot \frac{\Gamma(\nu_S)}{l\mu_S^{\nu_S}},$$

где Γ(ν) – гамма-функция; $\nu_S = \dfrac{2(m+k)-(n^*+n)+1}{l}$; $\mu_S = \beta_0(r^*+r)$.

Для мощности флуктуаций помехи на выходе квадратичного детектора имеем:

$$\sigma_N^2 = \int_0^\infty \left[\Phi_N(f) K_\Phi^2(f)\right]^2 \partial f = S_N^2 \gamma_0^{-2} K_0^4 \int_0^\infty f^{2(m+k)-2n^*} \exp(-2\beta_0 f^l r^*),$$

или после интегрирования:

$$\sigma_N^2 = S_N^2 \gamma_0^{-2} K_0^4 \frac{\Gamma(\nu_n)}{l\mu_n^{\nu_n}},$$

где $\nu_n = \dfrac{2(m+k)-2n^*+1}{l}$; $\mu_n = 2(\beta_0 r^*)$.

Для отношения сигнала к помехе, когда источник со спадом спектра n находится от приемника на расстоянии r, а фильтр настроен на спад спектра n^* и на расстояние r^*, запишем:

$$\hat{q} = \frac{I_S}{\sigma_N} = \frac{S_S}{S_N} \cdot \gamma_0 \cdot \frac{A(r)}{r^2} \cdot \frac{\Gamma(\nu_S)}{\sqrt{l \cdot \Gamma(\nu_n)}} \cdot \frac{\mu_n^{\frac{\nu_n}{2}}}{\mu_S^{\nu_S}}. \qquad (10)$$

Рассмотрим отношение величины отношения сигнала к помехе, полученной из (10), к его максимальному значению, определяемому из выражения (8).

Для величины отношения сигнала к помехе, нормированной по максимуму, запишем:

$$Q = \frac{\hat{q}}{q_{\max}} = \frac{(2\beta_0 r^*)^{\frac{\nu_n}{2}} \cdot (2\beta_0 r)^{\frac{\nu}{2}}}{(\beta_0 r^* + \beta_0 r)^{\nu_S}} \cdot \frac{\Gamma(\nu_S)}{\sqrt{\Gamma(\nu_n) \cdot \Gamma(\nu)}}.$$

Поверхность относительного значения отношения сигнала к помехе, нормированного по максимуму, в зависимости от расстояния и наклона спектра $Q(r^*/r, n^*/n)$ приведена на рис. 2.

Срезы поверхности вдоль координатных осей приведены на рис. 3, для каждого среза в двух масштабах по оси Q. На всех графиках расстояние и наклон спектра представлены относительно своего истинного значения.

Из графиков видно, что максимум функции достигается в единственной точке, в которой значения обоих параметров совпадают с истинными значениями. Следовательно, при решении задачи оценки расстояния методом «оптимальных частот» путем оптимизации вида АЧХ фильтра существует принципиальная возможность одновременной оценки расстояния r и параметра n.

Из графиков видно, что характер экстремумов приведенных зависимостей выражен слабо, поэтому для визуальной оценки аргумента максимума функции на рис. 3 необходимо было использовать укрупненный масштаб по оси Q. В практическом плане оценка пологого максимума функции потребует высокой точности измерений, которая может быть достигнута при больших значениях отношения сигнала к помехе.

Двухпараметрическую оптимизацию будем называть (как и в [6]) усовершенствованным методом «оптимальных частот». Под традиционным методом «оптимальных частот», как и прежде, понимаем метод оценки расстояния путем выбора центральной частоты широкополосного фильтра (6). Следует ожидать, что оба метода, скорее всего, будут обладать низкой помехоустойчивостью и характеризоваться большим значением случайной погрешности оценки расстояния.

Сопоставление результатов аналитических исследований с данными имитационного эксперимента. В работе [6] были проведены исследования усовершенствованного метода «оптимальных частот» путем компьютерного имитационного моделирования для разных регионов Мирового океана. Исследовался алгоритм решения задачи, реализованный в терминах проверки

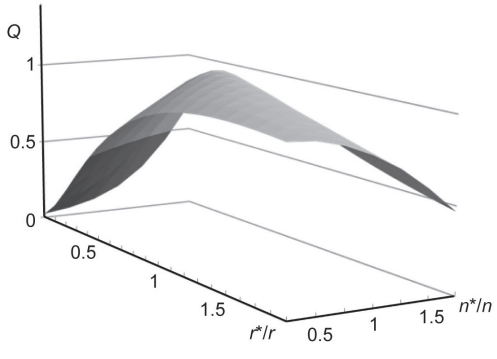

Рис. 2. Поверхность относительных значений отношения сигнала к помехе $Q(r^*/r, n^*/n)$ в координатах относительных расстояния и наклона спектра.

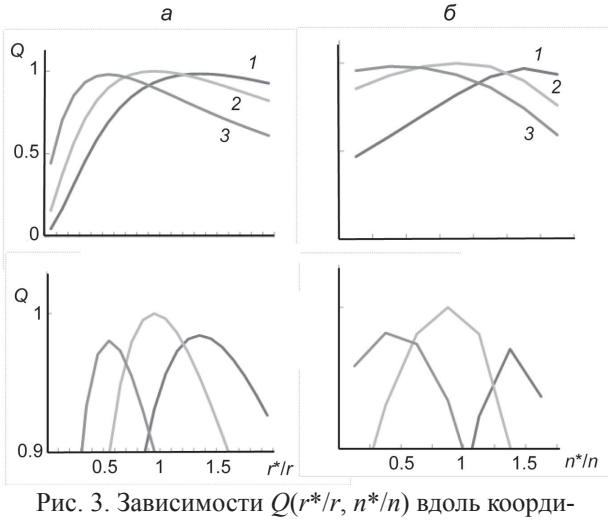

Рис. 3. Зависимости $Q(r^*/r, n^*/n)$ вдоль координатных осей для двух масштабов по оси Q.
а — вдоль оси r^*/r при n^*/n: *1* – 0.5, *2* – 1.0, *3* – 1.5;
б — вдоль оси n^*/n при r^*/r: *1* – 0.5, *2* – 1.0, *3* – 1.5.

гипотез. Рассматривались расстояния до цели от 10 до 80 км, исходные спектры широкополосного сигнала с наклоном от 3 до 8 дБ/окт. Моделирование проводилось в условиях, близких к достижимым на практике: рабочий диапазон частот при моделировании составлял 0.3–8.0 кГц, условия по отношению сигнала к помехе на индикаторе варьировались от −3 до +3 дБ. В результате моделирования получены значения относительной среднеквадратической погрешности оценивания расстояния от 7 до 20 %. Показано уменьшение погрешности оценки расстояния по мере роста отношения сигнала к помехе.

Если взять за основу условия проведения эксперимента в работе [6] (наклон спектра от 3 до 8 дБ/окт), то для среднего значения и среднеквадратического отклонения показателя степени n имеем $M_n = 1/88$; $\sigma_n \cong 0.31$, что согласно (7) для традиционного метода «оптимальных частот» дает:

$$\frac{\sigma_r}{r} \cong 0.17\sigma_n \cong 0.06 \ (6\ \%).$$

Видно, что значение относительной погрешности оценки расстояния, полученное экспериментально (7–20 %) при реализации усовершенствованного метода, и значение относительной погрешности оценки расстояния, полученное аналитически (6 %) для традиционного метода, совпадают по порядку величин. Сопоставимость точностных показателей усовершенствованного и традиционного методов обусловлена, на наш взгляд, условиями проведения эксперимента в работе [6], а именно ограничением диапазона частот и возможно малыми значениями отношения сигнала к помехе.

Если принять во внимание уменьшение погрешности оценки расстояния в усовершенствованном методе по мере роста отношения сигнала к помехе, показанное в работе [6], то можно заключить, что в экспериментах потенциальные возможности усовершенствованного метода не достигнуты, но могут раскрыться при значительно бóльших отношениях сигнала к помехе, чем те, которые рассмотрены в работе [6]. Это согласуется с мнением автора работы [4] о низкой помехоустойчивости усовершенствованного метода «оптимальных частот» относительно традиционного.

Совокупные результаты данной работы и работы [6] не позволяют говорить о явном преимуществе одного метода над другим по критерию минимальной погрешности оценки расстояния. Для выбора варианта реализации метода «оптимальных частот» представляется разумным в дальнейшем перевести исследования в практическую плоскость и решить ряд важных вопросов, общую цель которых можно обозначить как выявление и сравнение помехоустойчивости методов в зависимости от параметров источника сигнала, от параметров среды распространения сигнала, от параметров приемного тракта гидролокатора.

***

Аналитические исследования метода «оптимальных частот» показали, что наряду с традиционной реализацией метода оценки расстояния на основании выбора центральной частоты широкополосного фильтра возможна и альтернативная усовершенствованная реализация метода оценки расстояния с одновременной оценкой наклона спектра широкополосного сигнала путем оптимизации вида АЧХ фильтра.

Анализ образования методической погрешности оценки расстояния в традиционном методе «оптимальных частот» позволил получить выражение для составляющей методической погрешности, обусловленной отсутствием данных о наклоне спектра широкополосного сигнала, и определить, что предельно достижимой относительной погрешностью оценки расстояния при неизвестном наклоне спектра сигнала, можно считать значение около 6 %.

Сравнительный анализ возможностей двух вариантов реализации метода «оптимальных частот» для оценивания расстояния до источника широкополосного сигнала с неизвестным наклоном спектра показал, что практическая значимость каждого из вариантов по критерию минимальной погрешности оценки расстояния может быть определена только после дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

References

1. *Gatkin N. G. et al.* The immunity of the standard tract detection. *K., Tekhnika,* 1971. (in Russian).
2. *Stepanov D., Shalyto A.* Genetic algorithm approach to observer's optimal trajectory design. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics.* 2012, 1, 90—95. (in Russian).

3. *Koryakin Yu. A., Smirnov S. A., Yakovlev G. V.* Hydroacoustic equipment for the ship: status and actual problems. *SPb., Nauka,* 2004. 410 p. (in Russian).
4. *Demidenko V. A., Perelmuter Yu. S.* Spectral Method of the Range Estimation. *Hydroacoustics.* 2006, 6, 51—59. (in Russian).
5. *Volkova. A. A., Konson A. D.* The Two-frequency Distance Estimation Method Potentialities. *Hydroacoustics.* 2009, 9, 43—51. (in Russian).
6. *Golubev A. G.* Rustling Object Coordinates Estimation Algorithm in Passive Sonar System. *Fundam. prikl. gidrofiz.* 2009, 1(3), 47—56. (in Russian).
7. Ocean acoustics / Ed. by L. M. Brekhovskikh. *M., Science,* 1974. 693 p. (in Russian).
8. *Zarayskiy V. A., Tyurin A. M.* Sonar Theory. *L., Naval Academy of the order of Lenin and Ushakov,* 1975. (in Russian).
9. *Matviyenko V. N., Tarasyuk Yu. F.* The range of hydroacoustic tools. *L., Sudostroyenie,* 1983. 205 p. (in Russian).
10. *Gradshteyn I. S., Ryzhik I. M.* Tables of integrals, sums, series, and products. *M., Nauka,* 1971. 1100 p. (in Russian).

Статья поступила в редакцию 14.02.2014 г.