

УДК 534.883

© А.Г.Голубев, 2012

ОАО «Камчатский гидрофизический институт», г.Вилючинск Камчатского края  
agg300@mail.ru

## ОБ АЛГОРИТМЕ КВАЗИСОГЛАСОВАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ТОНАЛЬНЫХ ЭХОСИГНАЛОВ

Для фильтрации тональных эхосигналов в условиях мешающего действия реверберационной помехи синтезируется узкополосный фильтр, амплитудно-частотная характеристика которого имеет низкий уровень вне полосы пропускания. Данное свойство фильтра достигается за счет введения взвешивающего окна при спектральном анализе. При традиционном выборе интервала спектрального разложения и параметров указанного окна ширина полосы пропускания фильтра оказывается рассогласованной с длительностью эхосигнала. В статье рассматривается вопрос синтеза фильтра, лишенного указанного недостатка.

**Ключевые слова:** фильтрация, реверберация, эхосигнал, окно, отношение сигнал/шум.

При решении задачи синтеза фильтра, предназначенного для обработки тональных эхосигналов в условиях мешающего действия, в частности реверберационной помехи, необходимо обеспечить низкий уровень амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) этого фильтра вне полосы пропускания (т.е. низкий уровень ореола). Реализация оптимального фильтра, АЧХ которого учитывает форму энергетического спектра результирующей помехи (в том числе реверберационной), связана как с проблемой дефицита априорной информации, так и с существенными необходимыми вычислительными ресурсами. Первый из этих факторов предопределен тем, что форма спектра реверберации априорно неизвестна, а ее уровень случаен и является функцией времени, а возможно, и направления наблюдения. Второй фактор обусловлен большим числом каналов обработки (сотни каналов доплеровской фильтрации в каждом из десятков–сотен пространственных каналов), а следовательно, большими необходимыми вычислительными ресурсами средств обработки. Реализация процедур адаптивной временной фильтрации (например, аналогов алгоритма пространственной фильтрации Кейпона), обеспечивающих автоматическое формирование провала в ореоле АЧХ на частотах, «пораженных» реверберацией, в данном случае представляется невозможной, поскольку минимально необходимый интервал накопления корреляционной матрицы обрабатываемого сигнала существенно превышает интервал квазистационарности реверберационной помехи. Кроме того, реализация процедур данного класса связана с еще большими потребностями в вычислительных ресурсах, чем реализация оптимальной процедуры.

В связи с изложенным традиционное проектирование предусматривает реализацию функции многоканальной (по доплеровскому сдвигу частоты) гребенки фильтров на базе процедуры ДПФ. При этом наряду с реализацией спектрального разложения (указанной процедуры ДПФ) на интервале времени  $\tau_a$ , равном длительности полезного сигнала  $\tau_c$ , осуществляется умножение (перед спектральным анализом) фрагмента принимаемого сигнала длительностью  $\tau_a$  на весовое окно. При  $\tau_a = \tau_c$  реализация операции ДПФ без весового окна обеспечивает согласованную фильтрацию тонального сигнала; при введении операции умножения обрабатываемой реализации сигнала на указанное окно ширина

полосы пропускания фильтра увеличивается, что приводит к ее рассогласованию с шириной полосы полезного сигнала. При этом «платой» за повышение помехоустойчивости обработки по отношению к реверберационной помехе является снижение помехоустойчивости обработки по отношению к компоненте помехи, имеющей равномерный спектр (последнюю далее для краткости называем шумовой помехой).

Представляется целесообразным решение задачи синтеза фильтра, обеспечивающее низкий уровень ореола АЧХ не вместо, а наряду с согласованием ширины полосы его пропускания с длительностью (шириной полосы) обнаруживаемого сигнала. Настоящая статья посвящена решению данной задачи.

**О типичных окнах, применяемых при спектральном анализе, и эффективности традиционной квазисогласованной фильтрации.** Функцию доплеровской гребенки квазисогласованных фильтров при обнаружении тональных эхосигналов выполняет процедура ДПФ. Обзор известных окон, применяющихся при решении задач спектрального анализа, приведен, в частности, в [1]. Одним из наиболее распространенных среди применяемых при временной обработке гидроакустических сигналов является окно Хеннинга, имеющее следующий вид:

$$w(n, \alpha, N_a) = \begin{cases} \cos^\alpha \left[ \pi \frac{n - 0.5(N_a - 1)}{N_a} \right] & 0 \leq n \leq N_a - 1, \\ 0 & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (1)$$

где  $N_a \gg 1$  – размерность процедуры ДПФ, определяемая традиционно как  $N_a = \tau_c f_d$ , где  $f_d$  – частота дискретизации обрабатываемого сигнала.

Проанализируем сравнительную эффективность обработки тонального эхосигнала при указанном окне в условиях мешающего действия шумовой помехи. Сравнение проведем с вариантом спектрального анализа с прямоугольным весового окна, т.е. окном  $w_0(n) = w(n, \alpha = 0)$ .

Отношение сигнал/шум  $q[w(n, \alpha)]$  (здесь и далее имеется в виду отношение по напряжению) на выходе фильтра с точностью до несущественной константы при указанных выше временных параметрах окна определяется как

$$q(\alpha, N_a) = \sum_{n=0}^{N_a-1} w(n, \alpha, N_a) / \sqrt{\sum_{n=0}^{N_a-1} w^2(n, \alpha, N_a)}. \quad (2)$$

Потери в помехоустойчивости обнаружения сигнала  $\Delta(\alpha)$  при мешающем действии только шумовой помехи определим как

$$\Delta(\alpha) = 20 \lg \frac{q[w_0(n)]}{q[w(n, \alpha)]}. \quad (3)$$

При проведении расчетов по формулам (2) и (3) с учетом (1) получаем следующие величины потерь, дБ:  $\Delta(\alpha = 1) \approx 0.9$ ;  $\Delta(\alpha = 2) \approx 1.8$ ;  $\Delta(\alpha = 3) \approx 2.4$ ;  $\Delta(\alpha = 4) \approx 2.9$ .

Рассмотренным значениям параметра  $\alpha = 1, 2, 3, 4$ , согласно [1], соответствуют величины максимальных уровней боковых лепестков АЧХ:  $-23, -32, -39$  и  $-47$  дБ и скоростей спада боковых лепестков  $V = -12, -18, -24$  и  $-30$  дБ/окт. В обеспечение необходимого подавления эффекта «просачивания» (в терминологии [1]) реверберационной помехи на выходы фильтров доплеровской гребенки, соответствующих относительно умеренным, а также большим доплеровским сдвигам частоты эхосигнала, необходимо использовать значения параметра  $\alpha$ , равные не менее 3. Как показали проведенные рас-

четы, при указанных актуальных значениях параметра  $\alpha$  потери помехоустойчивости по шумовой помехе составляют около 2.5 дБ, т.е. весьма существенны.

**Реализация квазисогласованной фильтрации при одновременном обеспечении низкого ореола АЧХ и согласовании полосы пропускания фильтров с длительностью полезного сигнала.** Задача синтеза алгоритма фильтрации (или оптимизации параметра этого алгоритма), строго говоря, должна решаться применительно к критерию качества в терминах максимизации если не вероятностных характеристик обнаружения, то хотя бы обеспечиваемого на выходе фильтра отношения сигнал/шум. Однако если учесть имеющий место на практике значительный диапазон изменения параметров, характеризующих помехосигнальную ситуацию, представляется целесообразным ограничиться рассмотрением такого критерия качества, как согласование полосы пропускания фильтра с шириной полосы или (что то же самое) с длительностью обнаруживаемого сигнала.

В обеспечение решения поставленной задачи была эмпирически установлена зависимость относительной ширины полосы пропускания фильтров  $F$  (в единицах, равных реализуемому частотному разрешению) на уровне  $\approx -3,9$  дБ от величины показателя степени косинуса  $\alpha$  при выполнении процедуры фильтрации посредством операции ДПФ размерности  $N$  с окном рассмотренного выше типа. Данная зависимость аппроксимируется следующей линейной функцией:

$$F \approx (0.241\alpha + 1.15) \frac{f_d}{N_a}. \quad (4)$$

Результаты расчетов по формуле (4) и полученная эмпирически (т.е. путем моделирования) зависимость  $F(\alpha)$  приведены на рис.1 при  $f_d / N_a = 1$ . (Примечание: представленные на рис.1 расчеты ширины полосы  $F(\alpha)$  и результаты моделирования относятся к определению этой ширины по уровню  $-3$ дБ, что меньше рассчитываемой по формуле (4) ширины полосы по уровню  $-3.9$  дБ в 1.12 раза; указанное обстоятельство на корректность сопоставления результатов расчетов и моделирования не влияет).

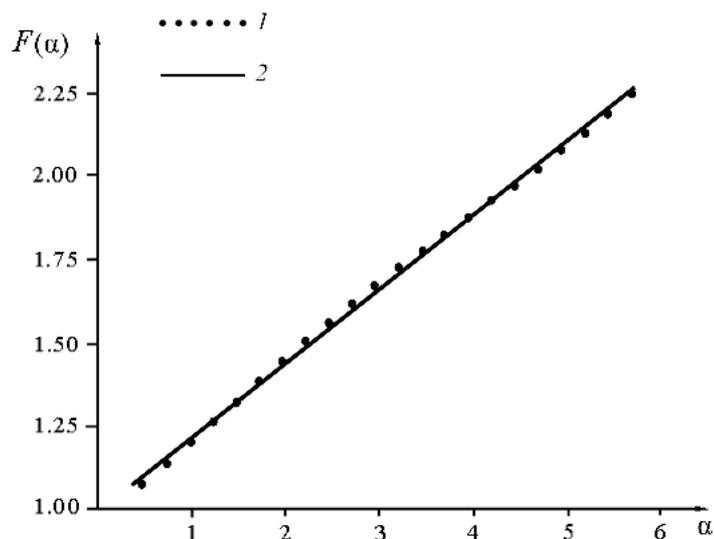


Рис.1. Эмпирическая (1) и аппроксимирующая (2) зависимости ширины полосы пропускания фильтров  $F(\alpha)$  по уровню  $-3$ дБ в единицах, равных реализуемому частотному разрешению ДПФ.

Видно, что результаты моделирования и расчетов по формуле (4) практически совпадают. При  $\alpha \geq 0.8$  использование аппроксимации (4) обеспечивает погрешность вычисления ширины полосы пропускания не более  $0.01 f_d N^{-1}$  Гц.

Согласование ширины полосы пропускания фильтров с длительностью полезного сигнала обеспечивается выполнением условия  $F = \tau_c^{-1}$ , откуда имеем

$$\tau_c^{-1} = (0.241\alpha + 1.15) \frac{f_d}{N_a}.$$

Введя обозначение  $K_\tau = N_a (f_d \tau_c)^{-1}$  (этот параметр равен отношению длины интервала спектрального анализа к длительности полезного сигнала), получим

$$\alpha = 4.15 K_\tau - 4.65. \quad (5)$$

Для проведения сравнительного (с традиционным вариантом алгоритма фильтрации, рассмотренным выше) анализа эффективности обработки рассчитаем величины параметра  $K_\tau$ , соответствующие значениям показателя степени  $\alpha = 1, 2, 3, 4$ . В соответствии с соотношением (5) искомые величины  $K_\tau$  составляют примерно 1.36, 1.61, 1.85, 2.09.

Отношение сигнал/шум  $q_0[w(n, \alpha)]$  на выходе рассматриваемого фильтра с точностью до той же несущественной константы, что и выше, вычисляется как

$$q_0[w(n, \alpha)] = \frac{\sum_{n=n_1}^{n_2} w(n, \alpha)}{\sqrt{\sum_{n=0}^{N_a-1} w^2(n, \alpha)}} \sqrt{K_\tau}, \quad (6)$$

где пределы суммирования в числителе  $n_1$  и  $n_2$  определяются как

$$n_1 = (N_a/2 - 1)(1 - K_\tau^{-1}), \quad n_2 = n_1 - 1 + N_a/K_\tau.$$

Множитель  $\sqrt{K_\tau}$  «приводит» масштаб длительности сигнала (его энергии) к рассмотренному выше.

Потери в помехоустойчивости обнаружения сигнала  $\Delta_0(\alpha)$  при мешающем действии только шумовой помехи определим (по аналогии с вышеизложенным) как

$$\Delta_0(\alpha) = 20 \lg \frac{q[w_0(n)]}{q_0[w(n, \alpha)]}. \quad (7)$$

Здесь числитель  $q[w_0(n)]$  рассчитан применительно к величине размерности ДПФ  $N_a = \tau_c f_d$ .

При проведении расчетов по формулам (6) и (7) с учетом (1) получаем следующие величины потерь, (результаты расчетов округлены до 0.05 дБ):

$$\Delta_0(\alpha = 1) \approx 0.35, \quad \Delta_0(\alpha = 2) \approx 0.45, \quad \Delta_0(\alpha = 3) \approx 0.5, \quad \Delta_0(\alpha = 4) \approx 0.5.$$

Из приведенных результатов следует, что эффективность предлагаемого алгоритма от величины параметра  $\alpha$  в широких пределах его изменения практически не зависит, что позволяет повышать помехоустойчивость обнаружения на фоне реверберационной помехи не в ущерб помехоустойчивости обнаружения по шумовой помехе. Указанное повышение обеспечивается увеличением отношения длины окна спектрального разло-

жения к длительности обнаруживаемого сигнала при соответствующем выборе параметра  $\alpha$ , согласно формуле (5). Данное действие благоприятно влияет как на величину максимальных уровней ореола АЧХ, так и на скорость спадаения уровней этого ореола с расстройкой частоты. Из упомянутых результатов также следует, что при значениях параметра  $\alpha = 1, 2, 3, 4$  предлагаемый вариант выбора параметров алгоритма фильтрации обеспечивает выигрыш в эффективности обнаружения в сравнении с традиционным примерно 0.5, 1.3, 1.9, 2.4 дБ соответственно.

При равных значениях параметра  $\alpha$  сравниваемые варианты выбора параметров алгоритма фильтрации характеризуются равными значениями максимальных уровней боковых лепестков АЧХ, но эквивалентные скорости спадаения этих уровней в сопоставляемых вариантах проектирования различны. Под эквивалентной понимаем скорость спадаения АЧХ предлагаемого фильтра, вычисляемую с учетом следующего обстоятельства. Пересчет шкалы частот в логарифмическую для классического фильтра осуществляется применительно к масштабу, определяемому частотным разрешением  $\delta f = 1/\tau_c$ . При этом те же (что и в случае рассмотрения классического фильтра) расстройки частоты применительно к предлагаемому фильтру (при его частотном разрешении  $\delta f_0 = \delta f / K_\tau$ ) соответствуют  $1 - \log_2 K_\tau$  октавы логарифмической шкалы классического фильтра. При таком определении эквивалентная скорость спадаения ореола АЧХ при предлагаемом варианте проектирования ( $V_0$ ) связана со скоростью спадаения в классическом варианте ( $V$ ) соотношением (дБ/окт)

$$V_0 = V(1 + \log_2 K_\tau).$$

Так, при рассматриваемых значениях параметра  $\alpha = 1, 2, 3, 4$  скорость спадаения уровней боковых лепестков АЧХ (в дБ/окт) в предлагаемом варианте проектирования фильтра оказывается выше, чем в традиционном, соответственно примерно в 1.45, 1.7, 1.9 и 2.1 раза. То есть, например, если при  $\alpha = 2$  в классическом варианте имеем скорость спадаения, равную  $-18$  дБ/окт, то в предлагаемом варианте эта скорость составляет  $-30$  дБ/окт.

**Режим фильтрации с динамическим управлением параметрами весового окна.** Как показано выше, предлагаемый вариант проектирования процедуры фильтрации (наряду с отмеченными положительными эффектами) в условиях работы на фоне только шумовой помехи характеризуется некоторыми потерями относительно традиционной согласованной фильтрации (реализуемой без использования весового окна). Так, при значении параметра весового окна  $\alpha = 3$  эти потери составляют 0.5 дБ. В обеспечение их нивелирования предлагается следующая процедура динамического управления параметрами весового окна.

В тракте обработки тональных эхосигналов в обеспечение нормирования и центрирования помехи в каждом частотном (доплеровском) канале обработки реализуется текущее оценивание уровня суммарной помехи. Если при этом сопоставлять текущие уровни помехи в частотных каналах, соответствующих центральному (т.е. нулевым и близким к нулевым) доплеровским каналам обработки, с уровнями помехи в периферийных доплеровских каналах, то в процессе хода развертки дальности можно зафиксировать момент примерного равенства этих уровней. Под указанным равенством можно понимать превышение уровня помехи в центральных каналах над уровнями помехи в периферийных каналах не более чем на 6–12 дБ. В последней ситуации применение весового окна с целью подавления бокового поля АЧХ фильтра становится неоправданным. При этом целесообразно переключение окна с косинусного (в степени  $\alpha$ ) на прямоугольное, согласованное с длительностью сигнала.

В обеспечение стабилизации коэффициента передачи тракта обработки по помехе при таком переключении прямоугольное окно имеет следующий вид:

$$w(n) = \frac{\sqrt{\sum_{n=0}^{N_a-1} w^2(n, \alpha)}}{\sqrt{\tau_c f_d}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=0}^{N_a-1} w^2(n, \alpha)}}{\sqrt{N_a K_\tau^{-1}}} \text{ при } n_1 \leq n \leq n_2;$$

$$w(n) = 0 \text{ при } 0 \leq n \leq n_1 - 1 \text{ и } n_2 + 1 \leq n \leq N_a - 1$$

(величины  $n_1$  и  $n_2$  определены выше).

При работе в условиях зональной структуры поля сигнала (немонотонный закон спада уровня реверберации со временем в пределах развертки дальности) процедура переключения весового окна может быть автоматически реализована требуемое число раз.

Предлагаемый режим работы тракта обеспечивает эффективную обработку по той компоненте суммарной помехи, которая является определяющей в каждый момент времени. Реализация процедуры динамического переключения весового окна обеспечивает практически полное нивелирование потерь эффективности обработки по отношению к шумовой помехе как «платы» за эффективность обработки по отношению к реверберации.

\*\*\*

Предложен вариант синтеза квазисогласованного с тональным эхосигналом фильтра, предусматривающий реализацию процедуры спектрального анализа (ДПФ) при интервале разложения, большем длительности обнаруживаемого сигнала. Приведено соотношение, позволяющее оптимизировать параметр (показатель степени косинуса) весового окна при выбранном соотношении интервала спектрального разложения и длительности обнаруживаемого сигнала.

Использование предлагаемого варианта выбора параметров фильтра приводит к существенному повышению качества обработки за счет одновременного согласования ширины полосы пропускания фильтра с длительностью сигнала и обеспечения низкого ореола его АЧХ.

При этом за счет реализации предлагаемых усовершенствований обеспечивается:

- повышение помехоустойчивости фильтрации при мешающем действии помехи с равномерным спектром в практически интересных ситуациях примерно на 2 дБ;
- повышение помехоустойчивости фильтрации при мешающем действии реверберационной помехи за счет обеспечения практически в 2 раза большей (в дБ/окт) скорости спада ореола АЧХ с увеличением расстройки частоты, а также возможности понижения всего ореола без повышения потерь помехоустойчивости по помехе с равномерным спектром.

Реализация динамического управления параметрами весового окна, основанного на анализе текущего соотношения спектральных плотностей компоненты помехи с равномерным спектром и реверберации, обеспечивает на временном интервале, соответствующем финальной части развертки дальности, получение дополнительного повышения в эффективности обработки на 0.5 дБ.

## Литература

1. Хэррис Ф.Дж. Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье // ТИИЭР. 1978. Т.66, № 1. С.60–96.

Статья поступила в редакцию 06.09.2011 г.

