

О НИЗКОЧАСТОТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛА В ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЯХ СКОРОСТИ ЗВУКА

В.И. Бабий, М.В. Бабий

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: ocean@alpha.mhi.iuf.net

Выполнено сравнение характеристик фильтров низких частот, весовые функции которых описываются тригонометрическими рядами конечной длины. С учетом специфики построения гидрофизических измерителей скорости звука показана целесообразность применения плосковершинного цифрового фильтра низких частот, временное окно которого описывается пятью членами ряда.

Исследования мелкомасштабной структуры поля скорости звука в океане прямым методом относятся к области динамических измерений [1,2]. Знание динамических свойств гидрофизических измерителей скорости звука (ГИСЗ) необходимо для оценки динамических погрешностей результатов измерений. Поскольку гидроакустические датчики скорости звука практически безынерционны, то усреднение по пространству и по времени происходит в разных звеньях ГИСЗ. В результате пространственной низкочастотной фильтрации многомерного поля скорости звука получаем на выходе датчика одномерный аналоговый электрический сигнал. В современных ГИСЗ информативным параметром этого сигнала является интервал времени T_1 между отраженными на акустической базе звуковыми импульсами [3,4]. На практике интервал T_1

имеет величину $\sim 0.1-1$ мс, тогда как интервал дискретных отсчетов на выходе ГИСЗ на два-три порядка больше. По сравнению с простым равновесным усреднением это обстоятельство позволяет улучшить динамические характеристики ГИСЗ посредством фильтров низких частот (ФНЧ) с неравновесными временными окнами $H(\tau)$.

На рис.1 приведена структурная схема обработки измерительной информации в перспективном импульсном времяпролетном ГИСЗ. После пространственного усреднения и преобразования в блоках 2,3 аналоговый сигнал (интервал времени T_1) в блоке 4 преобразуется в код. В блоке 5 по заданным критериям исправляются сбои, выбросы, промахи, после чего сигнал подается на вход вычислителя 6, где коды интервалов T_1 пересчитываются с учетом влияющих факторов в скорость звука C по алгоритму [4]. Эта операция необходима для линеаризации тракта перед ФНЧ, поскольку $C \sim 1/T_1$. Затем сигнал подвергается цифровой низкочастотной фильтрации в блоке 7, откуда через интерфейс 8 информация поступает к потребителю. Ограничение выбросов сигнала в блоке 5 перед низкочастотной фильтрацией аналогично известному в радиотехнике методу ШОУ (широкая полоса – ограничение – узкая полоса), эффективно снижающего вклад энергии импульсных помех в полезный сигнал. Низкочастотная фильтрация сигнала в блоке 7 уменьшает случайные погрешности блоков 1 - 3, шумы квантования АЦП блока 4 и погрешности округления в вычислителе 6. Блоки 4 - 8 могут быть реализованы в одном встроенном микропроцессоре соответствующей разрядности, памяти и скорости действия.

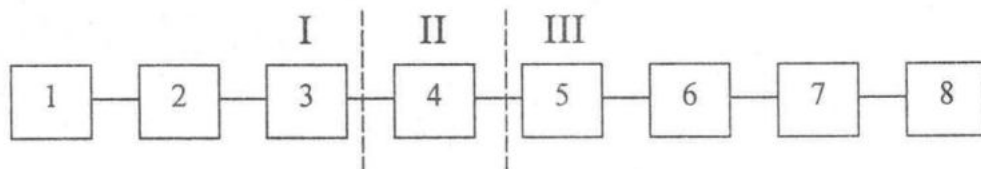


Рис.1 - Схема измерительной цепи ГИСЗ: I – аналоговая, II – аналого-цифровая, III – цифровая части. 1- объект измерения (морская среда); 2- датчик (пространственный аналоговый ФНЧ); 3- формирователь временных интервалов T_1 ; 4- измеритель временных интервалов T_1 (интегрирующий АЦП); 5- блок исправления сбоев; 6- вычислитель скорости звука; 7- цифровой ФНЧ с неравновесным временным окном; 8- интерфейс

Таблица - Параметры фильтров низких частот

№	Тип ФНЧ	F_0	F_1	$F_{0.7}$	$F_{0.99}$	$F_{0.99}/F_{0.7}$	F_0/F_1	β , дБ	ν
1	Дирихле	1	0.45	0.44	0.075	0.17	2.22	-11	$1/f$
2	Хэмминга	2	0.68	0.65	0.11	0.17	2.95	-33	$1/f$
3	Блэкмана	3	0.86	0.82	0.14	0.17	3.50	-53	$1/f^3$
4	Блэкмана-Хэрриса	4	1.00	0.94	0.16	0.17	4.00	-87	$1/f^3$
5	Плоско-вершинный	5	1.88	1.86	0.75	0.40	2.65	-70	$1/f$

В настоящее время известно большое число усредняющих окон, предложенных различными авторами в разное время [5]. Ниже рассмотрены некоторые симметричные временные окна, описываемые конечными тригонометрическими рядами. Эти окна ограничены (финитны), т.е. определены на интервале $-T/2 \leq \tau \leq T/2$, а, следовательно, они дают нули амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). В табл. приведены основные параметры ФНЧ, соответствующие этим окнам. Они расположены в порядке возрастания числа членов тригонометрического ряда, причем номер строки соответствует числу членов ряда. Параметр $F_0 = f_0 T$ - приведенная частота первого нуля АЧХ; $F_{0.7}$ соответствует спаду основного лепестка АЧХ до уровня 0.707;

$F_{0.99}$ - спаду АЧХ на 1%. Эффективная ширина полосы пропускания ФНЧ

$$F_1 = |A(0)|^{-2} \int_0^{F_0} |A(F)|^2 dF,$$

где $A(0)$ - статический коэффициент передачи, $F = f T$ - приведенная (безразмерная) частота, T - длительность окна. Сравнение F_1 и $F_{0.7}$ показывает, что они практически совпадают, а это значит, что $F_{0.7}$ можно использовать для оценки F_1 . Отношение $F_{0.99}/F_{0.7}$ характеризует крутизну спада АЧХ в полосе пропускания, а отношение F_0/F_1 - близость основного лепестка к АЧХ идеального ФНЧ.

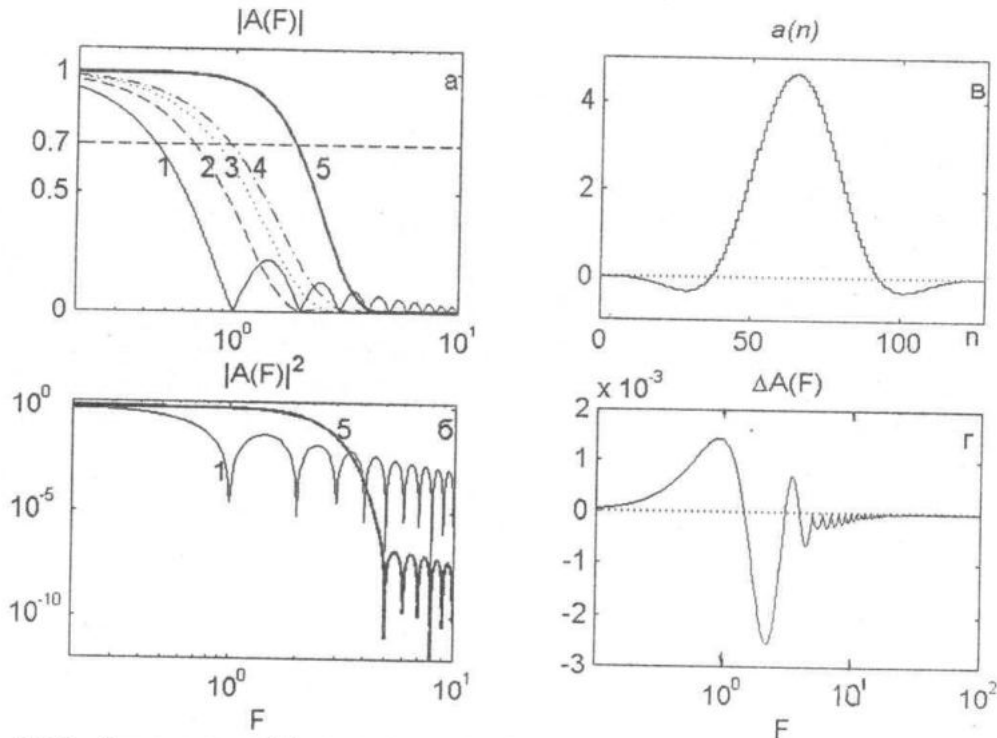


Рис.2 - Амплитудные (а) и энергетические (б) спектры непрерывных весовых функций (окон); в - окно плосковершинного ФНЧ, аппроксимированное ступенчатой функцией; г - разность амплитудных спектров аппроксимированного и непрерывного окон плосковершинного ФНЧ

Одним из важных параметров ФНЧ, характеризующих его качество, является отношение мощности всех боковых лепестков АЧХ к мощности основного лепестка:

$$\beta = \left[\int_{F_0}^{\infty} |A(F)|^2 dF \right] \left[\int_0^{F_0} |A(F)|^2 dF \right]^{-1}.$$

Другим параметром ФНЧ является скорость v спада амплитуды боковых лепестков с увеличением частоты. Роль параметров β и v важна при исследовании гидрофизических процессов со сплошным спектром для

$$H(\tau) = 1 + 1.933 \cos(2\pi \tau/T) + 1.286 \cos(4\pi \tau/T) + 0.388 \cos(6\pi \tau/T) + 0.032 \cos(8\pi \tau/T), \quad |\tau| \leq T/2. \quad (1)$$

Рассмотренные здесь окна являются непрерывными функциями времени. При цифровой фильтрации необходим переход к дискретному или ступенчатому аналогу этих окон. Если использовать ступенчатый аналог непрерывной весовой функции $H(\tau)$, то ее исходный амплитудный спектр надо умножить на $\text{sinc}(\pi f T_1)$. В виде примера на рис.2в приведен график ступенчатой аппроксимации непрерывной функции (1) при числе интервалов $N=T/T_1=128$.

АЧХ такого цифрового ФНЧ находим по формуле

$$A_1(F) = [\text{sinc}(\pi f T_1)] \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} a(n) e^{-j 2\pi n f T_1},$$

где коэффициенты $a(n)=H(\tau_n)$ соответствуют значениям непрерывной функции $H(\tau)$ в дискретные моменты времени τ_n , $F=fT=fNT_1$. Для ступенчато аппроксимированного окна должно выполняться условие нормировки

$$\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} a(n) = 1.$$

Разность между амплитудными спектрами этих окон определим так: $\Delta A(F) = A_1(F) - A(F)$ при фиксированном T . График рис.2г иллюстрирует практически полное совпадение их амплитудных, а следовательно, и энергетических спектров.

Преимущество цифровой фильтрации состоит в высокой воспроизводимости и стабильности АЧХ, а также возможности отдельного выбора частоты среза и частоты дискретных отсчетов на выходе ГИСЗ. Это очень существенно при адаптивных измерениях и коррекции динамической

оценки погрешности перекрытия спектров при дискретизации. На рис.2а, 2б представлены графики частотных характеристик ФНЧ, приведенных в таблице. Нумерация графиков соответствует номерам строк таблицы. Анализ данных таблицы и графиков рис.2а и 2б показывает, что по совокупности важнейших параметров наиболее целесообразно и в некотором смысле оптимально применение в ГИСЗ плосковершинного цифрового ФНЧ, весовая функция которого описывается выражением [5]:

погрешности методом инверсной фильтрации с учетом спектров сигнала и инструментальных шумов измерителя [6]. Рассмотренная схема низкочастотной фильтрации сигнала применима и к другим гидрофизическим измерительным каналам с безынерционными датчиками, например, электропроводности, давления, прозрачности, показателя преломления света и т.п.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабий В.И. Мелкомасштабная структура поля скорости звука в океане. -Л.: Гидрометеоздат, 1983. - 200 с.
2. Грановский В.А. Динамические измерения: Основы метрологического обеспечения. -Л.: Энергоиздат, 1984. - 224 с.
3. Бабий В.И. Анализ погрешности измерителя скорости звука в воде. // Международн. науч.-техн. семинар «Морское и экологическое приборостроение». Сб. трудов. - Севастополь, 1995. - С. 78-79.
4. Бабий В.И. Математическая модель гидрофизических измерителей скорости звука и метод их метрологической аттестации. // Системы контроля окружающей среды: Сб. науч. тр. НАН Украины, МГИ. - Севастополь, 2002. - С.119-127.
5. Гутников В.С. Фильтрация измерительных сигналов. - Л.: Энергоатомиздат, 1990. - 192 с.
6. Василенко Г.И. Теория восстановления сигналов: О редукации к идеальному прибору в физике и технике. - М.: Сов. радио, 1979. - 272 с.