

Отримані результати дозволили ввести ряд удосконалень в модифікований геометричний метод, за рахунок чого його вдалося значно поліпшити, розробивши, таким чином, новий метод дослідження доплерівського акустичного сигналу. Виконано тестування і експериментальну апробацію модифікованого геометричного методу, які переконливо довели переваги розробленого методу перед вже існуючими.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Barannik E.A. Pulsed Doppler flow-line spectrum for focused transducers with apodized apertures / E.A.Barannik // Ultrasonics. – 2001. – Vol.39, N2. – Pp.311-317.
2. Хилл К. Применение ультразвука в медицине: физические основы / под ред. Хилла К. – М.: Мир, 2009. – 568с.
3. Осипов Л.В. Ультразвуковые диагностические приборы: практическое руководство для пользователей / Осипов Л.В. – М.: Видар, 1999. – 256с.
4. Rowan M. An injury mimicking ultrasound phantom as a training tool for diagnosis of internal trauma / Rowan M., Pedersen P.C. // IEEE Ultrasonics Symp. Proc. – Canada, 2006. – Pp.861-873.

Надійшла до редколегії 02.05.2018.

УДК 519.246:524

DOI 10.31319/2519-2884.32.2018.173

ИГНАТКИН В.У., д.т.н., профессор

Днепропетровский государственный технический университет, г. Каменское

### ОЦЕНКА СПЕКТРА МОЩНОСТИ СИГНАЛА В НАПРАВЛЕННЫХ ПРИЕМНЫХ СИСТЕМАХ

**Введение.** Цифровая обработка сигналов (ЦОС) имеет фундаментальное и прикладное значение в современной радиотехнике. Методы ЦОС используются для разработки и исследования радиоэлектронных устройств, а также для разработки многоканальных систем связи и многоканального полосового анализа-синтеза сигналов. Усовершенствование методов цифровой обработки сигналов имеет важное технико-экономическое значение при проектировании и разработке цифровых систем обработки информации, увеличению скорости передачи сообщений, защите информации.

**Постановка задачи.** Оценить спектр мощности сигнала на основе анализа его дискретной выборки из  $N$  значений на интервале времени  $[-T/2, +T/2]$  без традиционного подхода с применением временных окон Ханна, Хэмминга, Блэкмана и т.п. [1].

**Результаты работы.** Решается задача оценивания спектра мощности сигнала на основе анализа его дискретной выборки из  $N$  значений на интервале времени  $[-T/2, +T/2]$  без традиционного подхода с применением временных окон Ханна, Хэмминга, Блэкмана и т.п. [1]. Обычно при использовании дискретного преобразования Фурье  $X(\omega)$  с прямоугольным временным окном спектр мощности оценивают как  $\alpha |Y(\omega_i)|^2$ , где  $\alpha = \text{const}$ , и вычисляют симметричную линейную комбинацию вида

$Y(\omega_i) = X(\omega_i) + a_1 [X(\omega_{i-1})] + X(\omega_{i+1}) + a_2 [X(\omega_{i-2}) + X(\omega_{i+2})]$ . Такая линейная комбинация представляет собой свертку в частотной области и соответствует некоторой модуляции исходного прямоугольного временного окна. Например, для окна Ханна ( $a_1 = 0,5$ ) возникает множитель  $\cos^2(\pi t / T)$ , что позволяет уменьшить уровень боковых лепестков фильтра при расширении вдвое полосы фильтрации. Для окон Ханна и Хэмминга члены  $X(\omega_{i+2})$  не используются, а формула  $|Y(\omega_i)|^2$  содержит четыре квадратичных выражения:

$$\begin{aligned} & \bar{X}(\omega_i)X(\omega_i); \\ & b_1 [\bar{X}(\omega_{i-1})X(\omega_{i-1}) + \bar{X}(\omega_{i+1})X(\omega_{i+1})]; \\ & b_2 \{ \bar{X}(\omega_i)[X(\omega_{i-1}) + X(\omega_{i+1})] + X(\omega_i)[\bar{X}(\omega_{i-1}) + \bar{X}(\omega_{i+1})] \} / 2; \\ & b_3 \{ \bar{X}(\omega_{i-1})X(\omega_{i+1}) + X(\omega_{i-1})\bar{X}(\omega_{i+1}) \} / 2, \end{aligned}$$

где верхняя черта обозначает комплексное сопряжение;  $b_1, b_2, b_3$  – множители.

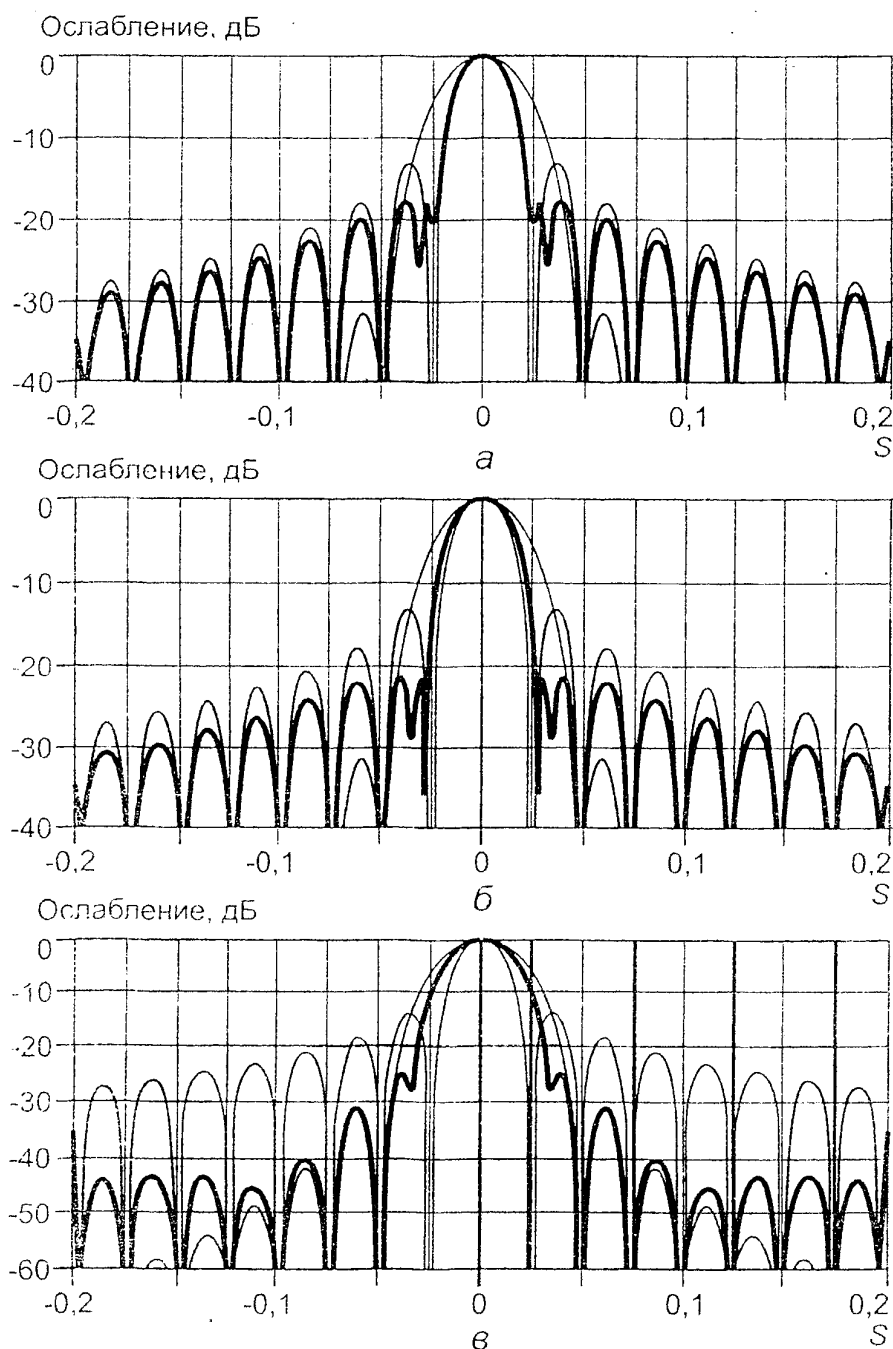
Для построения спектрального фильтра (Ханна, Хэмминга) изменяют только один параметр  $a_1$  вместо возможных трех параметров  $b_1, b_2, b_3$ , а параметр  $\alpha = \text{const}$  выбирают из некоторых условий нормировки, заданных для гармонического или шумового сигнала. При изменении трех параметров вместо одного можно ожидать появления решений с новыми свойствами. На рис.1, а приведены отклики фильтра на гармонический сигнал с параметрами  $b_1 = -0,01, b_2 = 0,42$  и  $b_3 = 0,54$ , найденными простым подбором вручную. Ширина полосы фильтрации практически такая же, как у фильтра с прямоугольным окном, а уровень первого бокового лепестка уменьшился с  $-3,5$  до  $-17,8$  дБ. По оси абсцисс отложен параметр  $S = \pi v T$ , где  $v$  – разность частоты гармонического сигнала и центральной частоты фильтра  $v_i \equiv \omega_i / (2\pi)$ .

Рис.1, б относится к фильтру, у которого первые боковые лепестки на 8,8 дБ ниже, а главный лепесток по уровню – 3 дБ шире всего на 14%, чем у фильтра с прямоугольным окном.

Рис.1, в иллюстрирует случай, промежуточный между прямоугольным окном и окном Ханна. Форма и уровни первых двух боковых лепестков фильтра с окном Ханна повторяются, ширина же главного лепестка существенно уменьшена.

На рис.1 также показаны отклики «энергетического» фильтра в сравнении с фильтрами на основе традиционных временных окон. Их построение не требует существенного увеличения времени вычислений по сравнению со временем, затрачиваемым на быстрое преобразование Фурье. Возникают другие возможности управления как шириной полосы фильтра, так и формой его вершины. Полный анализ свойств таких «энергетических» фильтров представляет собой интересное направление исследования, при этом использование членов, содержащих  $X(\omega_{i\pm 2})$ , существенно увеличивает размерность пространства переменных варьирования.

Описанный выше подход можно применять не только для оценки энергии сигнала в полосе частот, но и при угловой фильтрации принимаемой мощности сигнала для различных антенн, в частности гидроакустических. Для антенн, имеющих неэквилидистантный шаг приемников, суммарное количество параметров варьирования при оптимизации фильтрации может стать весьма значительным.



$$a - b_1 = 0,01, b_2 = 0,42, b_3 = 0,54; \quad б - b_1 = 0,02, b_2 = 0,46, b_3 = 0,32;$$

$$в - b_1 = 0,12, b_2 = 0,78, b_3 = 0,35$$

Рисунок 1 – Отклики на гармонический сигнал классических фильтров с прямоугольным окном и окном Ханна (тонкие линии), «энергетического» фильтра (жирная линия)

Частным случаем рассмотренного выше общего подхода применительно к направленным приемным системам является формирование двух разных выходных сигналов в полосе частот для двух разных диаграмм направленности приемного устройства и использование усредненного по времени произведения этих двух выходных сигналов. Произведение двух таких сигналов позволяет создать область

малой чувствительности приемного устройства в широком диапазоне углов благодаря увеличению количества направлений с «нулевой» чувствительностью, что дает возможность улучшить выделение мощности сигнала в рабочем направлении.

Интересно, применительно к спектральному анализу, рассмотреть случай, когда преобразование Фурье выполняется с двумя разными временными окнами по отдельности, а результат формируется из произведений действительных и мнимых частей первого и второго преобразований. При этом не требуется каких-либо оптимальных свойств от каждого из двух временных окон по отдельности, оптимизируется только конечный результат. Данный подход может оказаться эффективным, если одно из временных окон напоминает окно Кайзера – Бесселя [1]. В этом случае проведение свертки после преобразования Фурье становится трудоемким, требует много вычислительных операций, и временное окно удобнее применять непосредственно к анализируемому сигналу до преобразования Фурье. Для таких временных окон построение «энергетического» фильтра увеличивает время анализа примерно в два раза. Однако скорость вычислений не всегда является определяющим фактором, а совместное использование двух разных окон вместо одного расширяет возможности анализа.

Среди большого количества возможных практических задач, к которым можно, прежде всего, применить «энергетическую» фильтрацию, перспективно оптимизировать вертикальную гидроакустическую антенну с горизонтальным рабочим направлением приема и максимальным подавлением шумовой помехи от волнения поверхности моря. Задачу оптимизации в этом случае можно ставить с учетом рабочего диапазона частот как для средней, так и для максимальной помехи. Положительный эффект от применения «энергетической» фильтрации для приемных систем с низкой направленностью возможно позволит построить широкополосные приемные гидроакустические устройства, более эффективно выделяющие мощность слабого сигнала на фоне помехи.

**Выводы.** В статье решена задача оценки спектра мощности сигнала на основе анализа его дискретной выборки из  $N$  значений на интервале времени  $[-T/2, +T/2]$ . Отмечено, что результаты работы можно применять как для оценки энергии сигнала в полосе частот, так и при угловой фильтрации принимаемой мощности сигнала. Показаны перспективы использования полученных результатов и, в частности, для приемных систем с низкой направленностью и построения широкополосных устройств, выделяющих мощность слабого сигнала на фоне помехи, например, шумовой помехи от волнения моря.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных / Бендат Дж., Пирсол А. – М.: Мир, 1989. – 540с.

*Поступила в редколлегию 04.06.2018.*