

## СУЩНОСТЬ АДАПТИВНОГО ПОДАВЛЕНИЯ АКТИВНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ

ВИНТ ТУ АУНГ, А. А. ДМИТРЕНКО

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Беларусь)

E-mail: wintthuaung5306@gmail.com

**Аннотация.** В статье представлен подробный анализ адаптивного шумоподавления в фазированных антенных решетках с упором на методы пространственной адаптивной фильтрации, используемые в радиолокационных системах для повышения четкости сигнала путем минимизации помех. Исследование рассматривает процесс адаптивной фильтрации, который регулирует параметры фильтра в реальном времени на основе условий окружающей среды, тем самым обеспечивая оптимальный ответ на динамические помехи. Этот метод обеспечивает высокую точность желаемого сигнала за счет минимизации ошибки, достигаемой путем регулировки весовых коэффициентов, которые влияют на реакцию фильтра. Исследование далее изучает как одноканальные, так и многоканальные адаптивные фильтры, подчеркивая их эффективность в смягчении пространственно распределенного шума. Результаты способствуют улучшению характеристик радара, обеспечивая точное извлечение сигнала цели среди активных шумовых помех.

**Abstract** The article presents a detailed analysis of adaptive noise suppression in phased antenna arrays, focusing on spatial adaptive filtering techniques used in radar systems to enhance signal clarity by minimizing interference. The study addresses the adaptive filtering process, which adjusts filter parameters in real-time based on environmental conditions, thereby providing an optimal response to dynamic interference. This method ensures a high fidelity in the desired signal through minimized error, achieved by adjusting the weighting coefficients that influence the filter's response. The research further explores both single-channel and multi-channel adaptive filters, highlighting their efficacy in mitigating spatially distributed noise. The findings contribute to improved radar performance by enabling precise target signal extraction amid active noise interferences.

### Введение

Целью пространственной адаптивной фильтрации сигналов является выделение полезного сигнала (отраженного от цели) и подавление всех остальных мешающих излучений (в том числе активных шумовых помех (АШП)) [1-5].

Известно, что свойства любого фильтра с фиксированными параметрами определяются его передаточной функцией. В свою очередь, передаточная функция определяет структуру фильтра, его характеристики и вычислительную сложность. Параметры передаточной функции определяются видом и характеристиками обрабатываемых сигналов, которые должны быть известны с некоторой точностью.

Если же требования к передаточной функции невозможно сформулировать заранее вследствие отсутствия информации об ожидаемых к обработке сигналах, или эти требования могут изменяться в процессе работы, то вместо фильтра с фиксированными параметрами необходимо использовать адаптивный фильтр с изменяемыми во времени параметрами в зависимости от складывающихся условий окружающей обстановки.

Так как параметры пространственного адаптивного фильтра меняются в процессе его работы, то очевидно, что такой фильтр является нелинейным устройством. Однако при каждом фиксированном значении параметров адаптивный фильтр представляет собой линейное устройство, так как между его входными и выходными сигналами существует линейная зависимость, определяемая текущим набором весовых коэффициентов (ВК), подобно линейным фильтрам с фиксированными параметрами.

Таким образом, адаптивный фильтр – это фильтр с изменяемыми в процессе работы параметрами, набор которых в основном определяется выбранным критерием работы адаптивного фильтра. Наиболее распространенным критерием является достижение минимума некоторой целевой функции, как правило, квадратичной функции ошибки между так называемым требуемым и выходным сигналами адаптивного фильтра. Достижение минимума

целевой функции означает, что выходной сигнал адаптивного фильтра «близок» к требуемому сигналу, т.е. повторяет по форме этот сигнал.

### Формализация задачи компенсации активных шумовых помех в РЛС с фазированной антенной решеткой

При решении задачи компенсации АШП в системе с выделенным основным каналом в качестве требуемого выступает сигнал помехи на выходе основного канала, в качестве входных сигналов адаптивного фильтра выступают входные сигналы дополнительных компенсационных каналов, а в качестве выходного сигнала адаптивного фильтра – сумма взвешенных сигналов с выходов дополнительных каналов. Взвешивание сигналов дополнительных каналов осуществляется путем их перемножения с вектором ВК, которые являются объектом управления в пространственном адаптивном фильтре.

В качестве целевой функции при пространственной компенсации АШП выступает мощность сигнала помехи на выходе фильтра, которая представляет собой разность между сигналом помехи в основном канале и взвешенной суммой сигналов помехи в дополнительных каналах.

Выходной сигнал адаптивного фильтра приближается к требуемому сигналу за счет изменения ВК, рассчитываемых на основе обработки требуемого и входных сигналов. В установившемся режиме значения ВК соответствуют минимуму целевой функции или находятся в небольшой окрестности этого минимума. Так как состояние адаптивного фильтра меняется в процессе настройки ВК, то считается, что он приспособляется или адаптируется к существующим условиям функционирования. Поэтому и такой фильтр, и алгоритм вычисления его ВК называют адаптивными.

Если условия функционирования меняются, то адаптивный фильтр может эти изменения в некоторой степени отслеживать. Если изменения в системе медленные, т.е. происходят за время, существенно превышающее длительность переходного процесса адаптивного фильтра, то этот фильтр такие изменения, как правило, отслеживает. По мере же увеличения скорости изменений в системе эффективность адаптивного фильтра падает, так как за время изменения он не успевает «полностью настроиться», т.е. перейти в установившийся режим, когда его переходный процесс считается законченным.

В общем случае одноканальный адаптивный фильтр представляет собой устройство, показанное на рисунке 1.

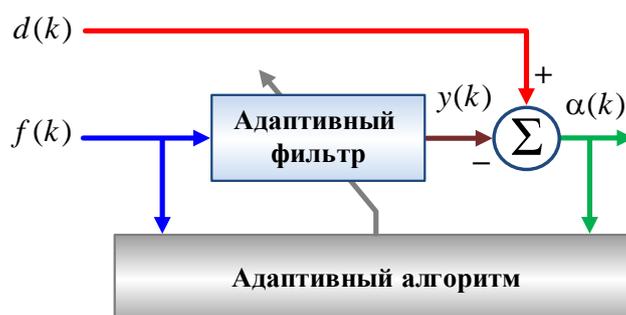


Рис. 1. Одноканальный адаптивный фильтр

где  $f(k)$  – входной сигнал;  $d(k)$  – требуемый сигнал;  $y(k)$  – выходной сигнал;  $\alpha(k)=d(k)-y(k)$  – сигнал ошибки;

$k$  – индекс дискретного времени или номер отсчета обрабатываемого сигнала.

Отсчеты равномерно распределены на оси времени как:

$$t=kTS=k/FS \quad (1)$$

где  $TS$  – период дискретизации;  $FS$  – частота дискретизации обрабатываемых сигналов.

Длительность одной итерации адаптивного алгоритма, т.е. время, в течение которого осуществляется расчет ВК, используемых для вычисления выходного сигнала адаптивного фильтра на следующей итерации, в большинстве случаев равна одному периоду дискретизации. Если расчет ВК ведется медленно, т. е. в течение нескольких периодов дискретизации, то формирование сигнала  $y(k)$  все равно необходимо осуществлять на каждом периоде дискретизации для удовлетворения требованиям теоремы Котельникова.

Для работы адаптивного фильтра, как правило, недостаточно информации, получаемой только из входного сигнала. Источниками недостающей информации обычно служит требуемый сигнал  $d(k)$  и сигнал ошибки адаптивного фильтра  $\alpha(k)$ .

Устройство автоматической компенсации мешающих излучений представляет собой многоканальный адаптивный фильтр (рисунок 2) с одним ВК в каждом канале.

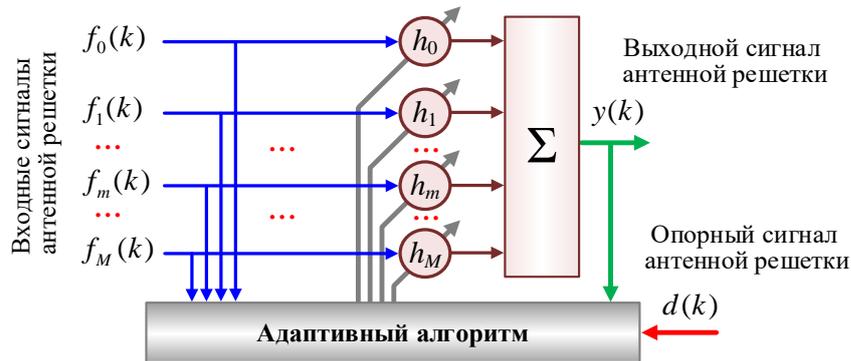


Рис. 2. Многоканальный пространственный адаптивный фильтр

В общем случае в алгоритмах вычисления ВК для фазированных антенных решеток (ФАР) используются входные сигналы  $f_1(k), f_2(k), \dots, f_m(k), \dots, f_M(k)$ , выходной  $y(k)$  и требуемый  $d(k)$  сигналы. В то же время в ФАР могут также применяться алгоритмы, не требующие сигнала  $d(k)$ , если в структуре РЛС выделен основной канал обработки радиолокационной информации, оптимальный в отсутствие помех и направление приема полезного сигнала известно. В этом случае это направление может быть использовано в качестве характеристики полезного сигнала путем «введения в алгоритм» линейного ограничения, обеспечивающего необходимый уровень полезного сигнала на выходе ФАР.

Антенная решетка характеризуется диаграммой направленности антенны, т.е. амплитудно-угловой характеристикой  $|F(\Theta)|$ , которая с помощью ВК может менять свою форму, обеспечивая требуемые значения в направлениях на источники принимаемых сигналов, например, единичное в направлении на источник полезного сигнала и нулевое или «очень маленькое» в направлениях на источники помех. ФАР с комплексными ВК характеризуется наличием  $M$  степеней свободы. Она может принимать, например, один полезный сигнал и полностью подавлять  $M-1$  сигналов источников пространственно-разнесенных помех.

Выходной сигнал  $y(k)$  пространственного адаптивного фильтра формируется как линейная комбинация отсчетов входных сигналов  $f_m(k)$ , взятых с весами  $h_m(k-1)$ , вычисляемыми на предыдущих итерациях  $(k-1)$  по отношению к текущим итерациям  $k$ , т. е. как:

$$y(k) = \sum_{m=1}^M h_m^*(k-1) f_m(k) = \mathbf{h}^H(k-1) \mathbf{f}_m(k), \quad (2)$$

где  $M$  – число ВК фильтра;  $\mathbf{h}_M(k-1)$  – вектор ВК:

$$\mathbf{h}_M(k-1) = [h_1(k-1), h_2(k-1), \dots, h_m(k-1), \dots, h_{M-1}(k-1), h_M(k-1)]^T; \quad (3)$$

$\mathbf{f}_M(k)$  – вектор входных сигналов в фильтре:

$$\mathbf{f}_M(k)=[f_1(k), f_2(k), \dots, f_m(k), \dots, f_{M-1}(k), f_M(k)]^T. \quad (4)$$

Порядок фильтра определяется как  $M-1$ , т. е. по числу каналов. Векторы  $\mathbf{h}_M(k)$  и  $\mathbf{f}_M(k)$  в общем случае являются комплексными.

Используя выходной сигнал адаптивного фильтра (2), можно вычислить сигнал априорной ошибки требуемого сигнала  $d(k)$  как:

$$\alpha(k) = d(k) - y(k) = d(k) - \mathbf{h}_M^H(k-1)\mathbf{f}_M(k). \quad (5)$$

Сигнал апостериорной ошибки определяется при ВК, равных  $\mathbf{h}_M(k)$ , как:

$$e(k) = d(k) - \hat{y}(k) = d(k) - \mathbf{h}_M^H(k)\mathbf{f}_M(k). \quad (6)$$

Термины «априорный» и «апостериорный» связаны со значениями ВК адаптивного фильтра, вычисляемыми соответственно на предыдущей и текущей итерациях алгоритма адаптивной фильтрации.

На практике при работе адаптивного фильтра на его выходе наблюдаются априорные ошибки (5), так как текущее значение выходного сигнала фильтра  $y(k)$  формируется по значениям ВК, вычисленным на предыдущей итерации. Апостериорные ошибки (6) обычно используются в алгоритмах вычисления ВК и при формировании целевой функции работы адаптивного фильтра.

### **Заключение**

Таким образом, адаптивный алгоритм – это процедура вычисления ВК, обеспечивающих минимизацию некоторой целевой функции адаптивного фильтра, т.е. выполнения критерия его работы. Алгоритм характеризуется видом используемой целевой функции и методом поиска оптимального решения. В адаптивных алгоритмах, как правило, используются арифметические операции как над априорными, так и над апостериорными ошибками. Процедуры вычисления выходных сигналов адаптивного фильтра в уравнениях (5) и (6), т.е. собственно фильтрация сигналов, также часто считаются составными частями адаптивного алгоритма.

### **Список использованных источников**

1. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д.И. Воскресенского и А.И. Канащенкова. – М.: Радиотехника, 2004 – 488 с.
2. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. – М.: Техносфера, 2013. – 528 с.
3. Костромицкий, С.М. Вопросы радиоавтоматики адаптивных антенных решеток / С. М. Костромицкий, И. Н. Давыденко; Нац. акад. Наук Беларуси, Центр радиотехники. – Минск: Беларус. навука, 2021. – 174 с.
4. Костромицкий, С.М. Математическая модель многоканального автокомпенсатора помех / С.М. Костромицкий, И.Н. Давыденко, А.А. Дятко // Электроника инфо. – 2010. – № 3. – С. 64 – 66.
5. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки. Введение в теорию. Пер. с англ. Челпанова В. Г., Лексаченко В. А. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.