

Применение обеляющего фильтра для обнаружения и различения полезного сигнала при небелом шуме

П. Н. Топчий, С. Г. Почивалов, А. С. Демченко
Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского

Аннотация. Для обнаружения и различения полезного сигнала на фоне возмущающего воздействия зачастую используют согласованный фильтр. Вместе с согласованным фильтром может использоваться обеляющий фильтр, с помощью которого можно обнаружить и различить сигнал на фоне небелых шумов.

Ключевые слова: согласованный фильтр, обеляющий фильтр, небелый шум

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные радиоэлектронные системы обработки сигналов часто сталкиваются с проблемой наличия шума, который искажает передаваемую информацию. В этом контексте важным является использование методов фильтрации сигналов, которые позволяют уменьшить уровень шума и повысить качество передачи информации. Одним из таких методов является применение обеляющего фильтра при небелом шуме, который будет рассмотрен в данной статье. Для подавления помех широкое распространение получили устройства защиты, которые реализуются на базе фильтров, осуществляющих режекцию помех. В настоящее время, как правило, режекция осуществляется в спектральной области с использованием преобразования Фурье. Бурное развитие электроники и вычислительной техники, появление высокопроизводительных процессоров и программируемых логических интегральных схем позволяет сделать реальным практическое применение самых сложных алгоритмов приёма и обработки радиосигналов. Высокое быстродействие современных вычислительных модулей способствует продвижению методов обработки сигналов на всё более высокие частоты.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Небелый шум является типом шума, который не обладает стационарностью в частотной области, а значит, его спектр зависит от времени. В связи с этим, обработка сигналов, зашумленных небелым шумом, является значительно более сложной задачей, чем обработка сигналов, зашумленных белым шумом.

Обеляющий фильтр (ОФ) является одним из наиболее эффективных методов фильтрации сигналов при наличии шума. Он реализует, так называемую, декорреляцию помехи, которая заключается в реализации методов оптимального приёма с использованием дополнительного фильтра, приводящего

наблюдаемое мешающее воздействие с неравномерной спектральной плотностью средней мощности $G_n(\omega)$ к воздействию с равномерной спектральной плотностью в полосе пропускания устройства обработки. Выравнивание спектра осуществляется с помощью линейного фильтра, передаточная функция $H_{оф}(j\omega)$

которого выбрана таким образом, что спектральная плотность мощности мешающего воздействия после прохождения через фильтр становится равномерной:

$$G_n(\omega) |H_{оф}(\omega)|^2 = N_n.$$

Модуль передаточной функции ОФ определяется формулой:

$$|H_{оф}(\omega)| = \sqrt{\frac{N_n}{G_n(\omega)}}.$$

Ограничения накладываются лишь на амплитудно-частотную характеристику фильтра.

На выходе ОФ помеха будет иметь равномерную спектральную плотность средней мощности, но в результате прохождения через фильтр изменится и спектр сигнала:

$$S_1(\omega) = H_{оф}(\omega) S_{ex}(\omega),$$

где $S_{ex}(\omega)$ – спектральная плотность сигнала $s_{ex}(t)$.

Передаточная функция оптимального устройства приёма сигналов на фоне помехи с неравномерной спектральной плотностью средней мощности, реализованного на основе критерия максимального правдоподобия имеет вид:

$$H_{сф}(\omega) = AS_1^*(\omega)e^{-j\omega T} = AS_{ex}^*(\omega)H_{оф}^*(\omega)e^{-j\omega T},$$

или

$$H_{сф}(\omega) = A\sqrt{N_n} \frac{S_{ex}^*(\omega)}{\sqrt{G_n(\omega)}} e^{-j\omega T}$$

Передаточная функция объединения двух фильтров имеет вид:

$$H_{pc\phi}(\omega) = H_{o\phi}(\omega)H_{c\phi}(\omega) = AN_n \frac{S_{ex}^*(\omega)}{G_n(\omega)} e^{-j\omega T} \quad (1)$$

Структура результирующего согласованного фильтра для выделения сигнала на фоне шума с неравномерным спектром представляет собой последовательное соединение ОФ и фильтра, согласованного с сигналом (сигнал, преобразованный ОФ).

Как и в случае шума с равномерным спектром, для максимизации отношения сигнал-шум необходимо обеспечивать учёт начальных фаз спектра входного сигнала. Поэтому в (1) входит комплексно-сопряжённая функция $S_{ex}^*(\omega)$. Модуль передаточной функции результирующего согласованного фильтра прямо пропорционален N_n и обратно пропорционален энергетическому спектру помехи $G_n(j\omega)$ на входе этого фильтра.

Спектр сигнала на выходе согласованного фильтра имеет вид:

$$S_{вых}(\omega) = S_{ex}^*(\omega)H_{o\phi}^*(\omega)H_{c\phi}^*(\omega) = AN_n \frac{|S_{ex}(\omega)|^2}{G_n(\omega)} e^{-j\omega T}$$

Значение сигнала в момент времени T определяется через спектр сигнала как обратное преобразование Фурье:

$$s_{вых}(T) = \frac{1}{2\pi} N_n \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|S_{ex}(\omega)|^2}{G_n(\omega)} e^{-j\omega T} e^{j\omega T} d\omega = \frac{1}{2\pi} N_n \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|S_{ex}(\omega)|^2}{G_n(\omega)} d\omega$$

Мощность шума на выходе результирующего согласованного фильтра определяется по формуле

$$P_{ш} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_n(\omega) |H_{o\phi}^*(\omega)H_{c\phi}^*(\omega)|^2 d\omega = \frac{1}{2\pi} N_n^2 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|S_{ex}(\omega)|^2}{G_n(\omega)} d\omega$$

Отношение сигнал-шум находится из выражения:

$$q^2 = \frac{s_{вых}^2(T)}{P_{ш}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|S_{ex}(\omega)|^2}{G_n(\omega)} d\omega$$

Таким образом, передаточная функция результирующего согласованного фильтра определяется выражением (1). На форму сигнала $s_{вых}(t)$ и на вид спектральной плотности мощности помехи $G_n(j\omega)$ никаких ограничений не налагалось и, следовательно, этот результат применим и для оптимального приёма шумоподобных сигналов с произвольными, но конечными базами. Применение обеслающего фильтра при небелом шуме требует предварительного анализа спектра шума и его характеристик. Для этого необходимо выполнить предварительную обработку сигнала, например, выделение его спектра с помощью

преобразования Фурье. Затем, на основе полученного спектра шума, можно рассчитать коэффициенты обеслающего фильтра.

Множитель в (1)

$$\Phi_n(\omega) = \frac{1}{G_n(\omega)}$$

представляет собой коэффициент, учитывающий вид спектральной плотности средней мощности помехи. Множитель этого же выражения $AN_0 S_{ex}^*(j\omega) e^{-j\omega T}$ – коэффициент передачи результирующего согласованного фильтра при шуме с неравномерной спектральной плотностью мощности. Множитель A определяет масштаб и принципиального значения не имеет.

На рис. 1 изображена структурная схема устройства, реализующего оптимальный приём сигнала на фоне шума с неравномерным спектром.

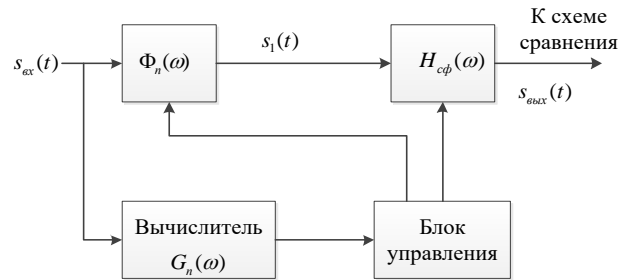


Рис. 1. Структурная схема приёмника сигналов на фоне помех с неравномерным спектром

Блок управления должен производить перестройку фильтра $\Phi_n(\omega)$ и соответствующую коррекцию согласованного фильтра $H_{c\phi}(\omega)$.

На рис. 2 изображено графическое представление работы обеслающего фильтра.

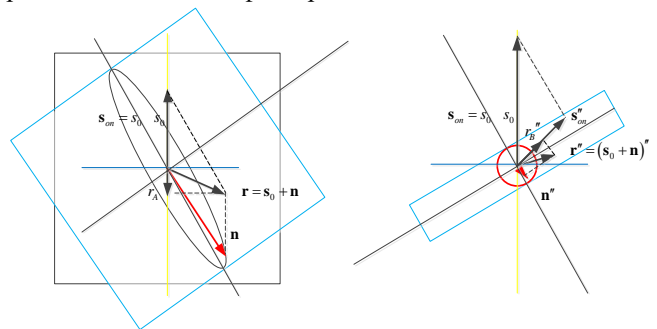


Рис. 2. Графическое представление работы ОФ

ОФ основан на алгоритме вычитания шума из сигнала путем вычисления мощности шума в каждой точке спектра и вычитания ее из мощности сигнала. В результате применения обеслающего фильтра, амплитуда сигнала остается неизменной, а уровень шума снижается.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применение обеляющего фильтра при небелом шуме является эффективным методом фильтрации. Его преимущества в радиотехнике заключаются в возможности увеличения дальности передачи сигналов, повышении точности измерений и уменьшении ошибок декодирования информации. Это позволяет улучшить качество радиосвязи и повысить надежность работы радиоэлектронных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Помехозащищённость систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев и др.; под ред. В.И. Борисова. М.: Радио и связь, 2003. 640 с.: ил.
- [2] Харкевич А.А. Борьба с помехами. М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1965. 275 с.
- [3] Защита от радиопомех / М.В. Максимов, М.П. Бобнев, Б.Х. Кривицкий и др.; под ред. М.В. Максимова. М.: «Советское радио», 1976. 496 с.: ил.
- [4] Посохин Н.И. Радиоэлектронная борьба: учебное пособие / Н.И. Посохин, В.Г. Сонников, Ю.Н. Максимов. СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2004. 522 с.
- [5] Шумоподобные сигналы в каналах управления космическими аппаратами. Часть 1 Свойства и принципы формирования: учебное пособие / Е.П. Ряховский, А.В. Харченко. СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2013. 146 с.
- [6] Ряховский Е.П. Шумоподобные сигналы в каналах управления космическими аппаратами. Часть 2. Принципы применения: учебное пособие / Е.П. Ряховский. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2014 г. 223 с.
- [7] Харченко А.В. Модели и методы цифровой обработки сложных сигналов с компенсацией преднамеренных помех на основе ортогональных преобразований в радиоэлектронных системах космических комплексов военного назначения: дис. ... д-ра техн. наук: 20.02.25 / Харченко А.В. СПб. 2012. 458 с. инв. № 339521
- [8] Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах: пер. с англ. М.: Мир, 1979. 318 с.: ил.
- [9] Ахмед Н., Рао К.Р. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов: пер. с англ. М.: Связь, 1980. 248 с.: ил.
- [10] Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений / Т.С. Хуанг, Дж.-О. Эклунд, Г. Дж. Нуссбаумер и др.; под ред. Т.С. Хуанга: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1984. 224 с.: ил.
- [11] Залманзон Л.А. Преобразование Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 496 с.
- [12] Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления свёрток: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1985. 248 с.
- [13] Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 448 с.: ил.
- [14] Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: Учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1991. 608 с.: ил.
- [15] Веретягин А.А. Основы технической кибернетики и автоматике. В 2-х ч. Ч. 1. Статистическая радиотехника. / А.А. Веретягин, Б.Е. Рудницкий. Л.: ЛВИКА, 1969. 403 с.
- [16] Помехозащищённость систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев, Н.П. Мухин, В.И. Шестопапов; Под ред. В.И. Борисова. М.: Радио и связь, 2000. 384 с.: ил.