

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ФИЛЬТРА СЖАТИЯ СИГНАЛОВ С ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА УРОВНЯ БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ И МИНИМАЛЬНЫМИ ПОТЕРЯМИ В ОТНОШЕНИИ СИГНАЛ/ШУМ

Полуянчик К.И., студент гр. 341301

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Хмарский П.А. – канд. техн. наук, доцент

Предложена методика оптимизации параметров фильтра сжатия для кодово-фазоманипулированных сигналов, направленная на снижение уровня боковых лепестков автокорреляционной функции при ограничении потерь отношения сигнал/шум.

В современных радиотехнических системах широко используются сигналы с фазовой манипуляцией, обеспечивающие высокое разрешение по дальности [1]. Обработка таких сигналов как правило осуществляется с помощью фильтра сжатия (*matched filter*), который обеспечивает максимальное отношение сигнал/шум (ОСШ), однако характеризуется высоким уровнем боковых лепестков на выходе фильтра, что приводит к появлению ложных откликов, ухудшению качества обнаружения и маскировке слабых сигналов на фоне боковых лепестков от объектов с большой эффективной поверхностью рассеяния и мощных мешающих отражений [2].

Для снижения уровня боковых лепестков при фильтрации широкополосных сигналов (например, ЛЧМ) традиционно применяются весовые окна. Однако для сигналов с фазовой манипуляцией данный подход неприменим: структура кода уже оптимизирована под минимизацию боковых лепестков, и дополнительное взвешивание не обеспечивает их дальнейшего подавления. Альтернативой является использование фильтров с оптимизированной весовой функцией (*mismatched filter*), позволяющего достичь компромисса между уровнем боковых лепестков и потерями в ОСШ [3-6].

В работе предлагается методика параметрического синтеза фильтра, основанного на численной оптимизации его весовой функции. Импульсная характеристика фильтра $h_{MMF}(t)$ как взвешенная обращённая во времени копия сигнала:

$$h_{MMF}(t) = w(t)s^*(-t), \quad (1)$$

где $s(t)$ — передаваемый сигнал с фазовой манипуляцией; $w(t)$ — весовая функция.

Выход фильтра $y_{MMF}(\tau)$ собой корреляционную функцию сигнала с взвешенным шаблоном:

$$y_{MMF}(\tau) = \int s(t)w(t)s^*(t-\tau)d\tau, \quad (2)$$

Оптимизация весового вектора \mathbf{w} осуществляется по критерию минимизации пикового уровня боковых лепестков (ПУБЛ, англ. PSLR (Peak Sidelobe Level Ratio)) при ограничении на допустимые потери в ОСШ:

$$\min_{\mathbf{w}} PSLR(\mathbf{w}) = \min_{\mathbf{w}} \frac{\max_{\tau \in \Omega_{\text{пл}}} |y_{MMF}(\tau)|}{y_{MMF}(0)}, \quad (3)$$

при условии $\Delta L_{SNR}(\mathbf{w}) \leq 1.5$ дБ,

где $\Omega_{\text{пл}}$ — область главного лепестка; $\Delta L_{SNR} = SNR_{MF} - SNR_{MMF}$ — потери в ОСШ синтезируемого фильтра (MMF) относительно согласованного фильтра (MF).

Методика синтеза фильтра включает последовательность этапов, направленных на получение оптимальной весовой функции. На первом этапе формируется ФКМ-сигнал на основе заданной кодовой последовательности. Далее вычисляется выход согласованного фильтра $y_{MMF}(\tau)$, используемый в качестве базового варианта. После этого задаётся начальное приближение весового вектора \mathbf{w}_0 , в качестве которого принимается вектор, соответствующий согласованному фильтру.

На следующем этапе формируется задача оптимизации (3), целевой функцией которой является минимизация показателя PSLR при ограничении на допустимые потери ОСШ. Решение задачи осуществляется численным методом последовательного квадратичного программирования [6], в результате чего определяется оптимальный весовой вектор \mathbf{w}^* .

На заключительном этапе формируется фильтр с импульсной характеристикой (1) и проводится анализ выхода фильтра $y_{MMF}(\tau)$ с оценкой основных показателей качества. Дополнительно контролируется интегральный уровень боковых лепестков (ИУБЛ, англ. ISLR (Integrated Sidelobe Level)), определяемый как:

$$ISLR = \frac{\sum_{\tau \neq 0} |y(\tau)|}{y(0)}, \quad (3)$$

В качестве примера применения методики рассмотрена M-последовательность длины $N=31$. Полученные результаты (таблица 1 и рисунок 1) показывают, что применение синтезированного фильтра позволяет снизить уровень боковых лепестков на 4.7 дБ по сравнению с согласованным фильтром при ограниченных потерях ОСШ (0.6 дБ).

Таблица 1 – Сравнение характеристик фильтров сжатия для M-последовательности ($N=31$)

Фильтр	ПУБЛ, дБ	ИУБЛ, дБ	Потери в ОСШ, дБ
Согласованный фильтр сжатия (MF)	-15.8	-3.7	0.0
Синтезированный фильтр (MMF)	-20.5	-4.5	0.6

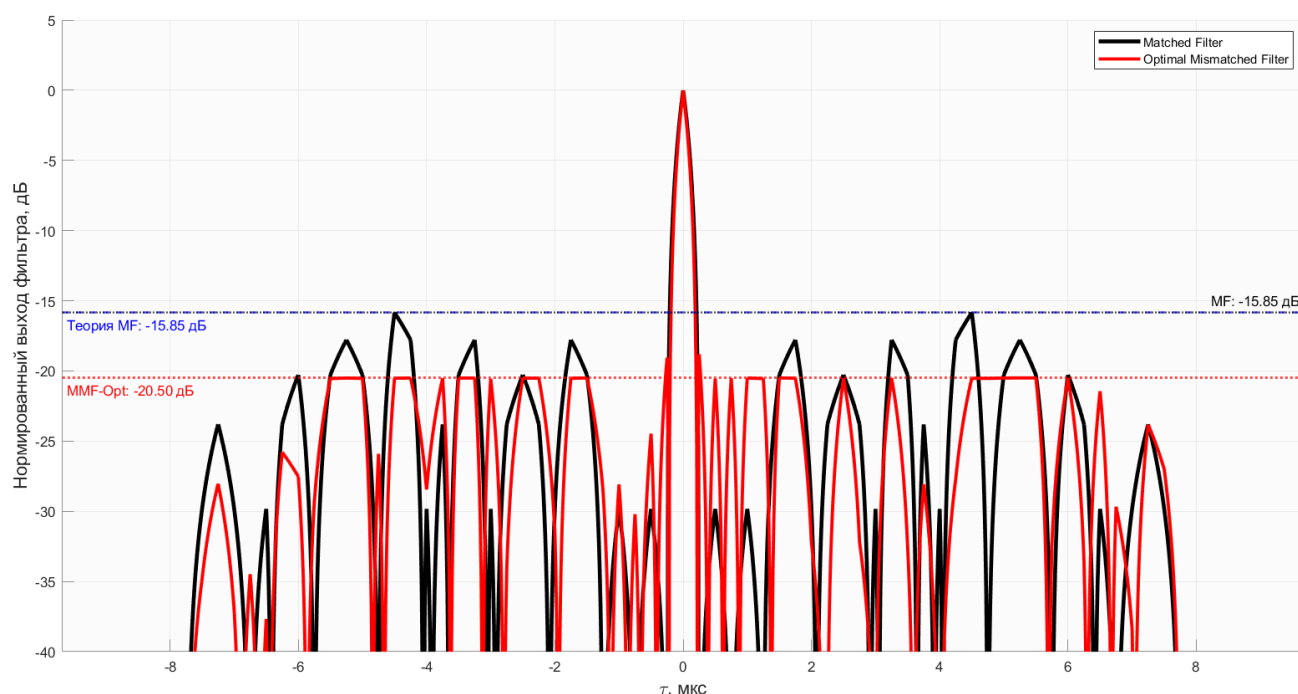


Рисунок 1 — Отклики согласованного и синтезированного фильтров

Таким образом, предложена методика оптимизации параметров фильтра сжатия КФМ-сигналов, основанная на численной минимизации уровня боковых лепестков при ограничении потерь ОСШ. В отличие от традиционных методов, основанных на применении фиксированных весовых окон, предложенный подход позволяет получать адаптивные весовые функции, обеспечивающие более эффективный компромисс между подавлением боковых лепестков и сохранением энергетических характеристик сигнала.

Список использованных источников:

1. Карпушкин, Э. М. Теория радиосистем: учебное пособие / Э. М. Карпушкин. – Минск: БГУИР, 2023. – 172 с.
2. Синтез фильтра фазокодированных сигналов с минимальным уровнем боковых лепестков / А.Ю. Колупаев [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии, 2023. – Т. 16, № 4. – С. 497–508.
3. Ackroyd, M.H. Optimum Mismatched Filters for Sidelobe Suppression / M.H. Ackroyd, F. Ghani // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1973. – Vol. AES-9, No. 2. – P. 214–218.
4. Kempf, J. M. A Modified Least-Squares Mismatched Filter for Use in Radar Applications with Additive Noise / J. M. Kempf, J. A. Jackson // 2020 IEEE International Radar Conference (RADAR). – 2020. – P. 804-809.
5. Jabran A. Mismatched Processing of Composite Waveforms with Small Neural Networks / A. Jabran // 2025 IEEE 101st Vehicular Technology Conference (VTC2025-Spring). – 2025. – P.1-6.
6. Чердынцев, В. А. Оптимизация информационных систем : учебное пособие / В. А. Чердынцев, В. В. Дубровский. – Минск : БГУИР, 2005. – 182 с.