

Повышение эффективности инверсной фильтрации сигналов на основе метода коррекции базиса

Р. Г. Хафизов[✉], И. Л. Егошина, А. С. Мертвищев, О. А. Хамарицкая

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия

[✉] hafizovrg@volgatech.net

Аннотация

Введение. Повышение разрешающей способности радиолокационных станций, превышающей рэлеевский предел, особенно важно для современных радиоэлектронных систем, функционирующих в условиях низкого отношения сигнал/шум и интенсивных внешних помех. Данная задача приобретает ключевое значение для обеспечения точного обнаружения и идентификации объектов на значительных расстояниях, что открывает широкие возможности для применения этой технологии. Один из эффективных методов обработки – инверсная фильтрация (ИФ), однако ее эффективность при традиционной реализации значительно снижается с ухудшением помеховой обстановки, что ограничивает область применения в реальных ситуациях.

Цель работы. Разработка и исследование подхода, направленного на повышение эффективности ИФ посредством внедрения и использования метода коррекции базиса, что позволяет улучшить качество обработки сигналов и повысить устойчивость системы к помехам.

Материалы и методы. Исследование основано на математическом моделировании процессов фильтрации и анализе влияния различных параметров на эффективность ИФ. Моделирование процессов осуществлялось в специально разработанном программном обеспечении. Использованы методы теории обработки сигналов, включая теорию матриц и теорию вероятностей.

Результаты. Предложен метод коррекции базиса, повышающий эффективность ИФ за счет увеличения отношения сигнал/шум на выходе фильтра. Получены зависимости отношения сигнал/шум от параметров коррекции. Введено понятие среднего квадрата нормы импульсной характеристики фильтра, что обеспечивает дополнительный аналитический инструмент для оценки и оптимизации метода. Предложен практический подход к реализации метода для повышения разрешающей способности радиолокационных систем.

Заключение. Метод коррекции базиса позволяет повысить эффективность ИФ и расширяет возможности ее использования в условиях низкого входного отношения сигнал/шум. Вклад исследования заключается в разработке новой методики улучшения качества обработки сигналов в радиолокационных системах, что позволяет расширить их применение даже при неблагоприятных условиях приема сигнала.

Ключевые слова: инверсная фильтрация, повышение отношения сигнал/шум, сжатие простого сигнала, нестационарный фильтр, коррекция базиса

Для цитирования: Повышение эффективности инверсной фильтрации сигналов на основе метода коррекции базиса / Р. Г. Хафизов, И. Л. Егошина, А. С. Мертвищев, О. А. Хамарицкая // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 5. С. 6–15.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-5-6-15

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 23.02.2025; принята к публикации после рецензирования 14.06.2025; опубликована онлайн 28.11.2025

Improving the Efficiency of Inverse Signal Filtering by Basis Correction Method

Rinat G. Khafizov✉, Irina L. Egoshina,

Alexander S. Mertvishchev, Olesya A. Hamaritskaya

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia

✉ hafizovrg@volgatech.net

Abstract

Introduction. Enhancing the resolution of radar stations beyond the Rayleigh limit is particularly important for modern radio electronic systems operating under conditions of low signal-to-noise ratios and intense external interference. This task becomes crucial for ensuring accurate detection and identification of objects at significant distances, which extend possibilities for applying this technology. Inverse filtering (IF) is an effective processing method; however, in standard cases, its efficiency depends significantly on the noise environment, limiting its application in real-world scenarios.

Aim. Development and investigation of an approach aimed at enhancing IF efficiency by introducing a basis correction method, which improves signal processing quality and increases system robustness to interference.

Materials and methods. The research was carried out using the methods of mathematical simulation of filtering processes and analysis of the influence of various parameters on the IF efficiency. Simulation studies were conducted in a specially developed software environment. The methods of signal processing theory, including matrix theory and probability theory, were used.

Results. A method of basis correction is proposed, which increases the efficiency of IF by increasing the signal-to-noise ratio at the filter output. Dependencies of the signal-to-noise ratio on correction parameters are obtained. The concept of the mean square of the filter's impulse response norm is introduced, providing an additional analytical tool for evaluating and optimizing the method. A practical approach for implementing the method to enhance the resolution of radar systems is proposed.

Conclusion. The basis correction method improves the efficiency of IF and extends its application capabilities in the conditions of a low input signal-to-noise ratio. The research significance consists in the development of a novel methodology for improving signal processing quality in radar systems, which extends their applicability under adverse signal reception conditions.

Keywords: inverse filtering, increasing the signal-to-noise ratio, simple signal compression, non-stationary filter, basis correction

For citation: Khafizov R. G., Egoshina I. L., Mertvishchev A. S., Hamaritskaya O. A. Improving the Efficiency of Inverse Signal Filtering by Basis Correction Method. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 5, pp. 6–15.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-5-6-15

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 23.02.2025; accepted 14.06.2025; published online 28.11.2025

Введение. В современных радиолокационных системах одним из ключевых требований является достижение высокой разрешающей способности, которая превышает "рэлеевский предел", что особенно актуально при работе в условиях воздействия шума [1]. Возможность сжатия простого сигнала во временной области – основное достоинство инверсной фильтрации (ИФ), методы реализации которой подробно рассматриваются в [2, 3]. В [4] приведен подход к обработке непрерывных радио-

локационных сигналов, близкий по структуре к ИФ. В [5–8] представлены примеры применения ИФ для повышения разрешающей способности в радиолокационных системах, включая реализацию в реальных задачах обработки импульсных сигналов. При этом инверсная фильтрация находит свое применение не только в системах обработки сигналов при решении задач разрешения сигналов, но и в системах обработки изображений при решении задач восстановления изображений [9].

В [10, 11] предложена методика оценки эффективности ИФ по значению отношения коэффициентов шума для инверсного и согласованного фильтров. В [11] показано, что коэффициент шума, определяемый как отношение выходного ко входному отношению сигнал/шум (ОСШ), для ИФ в $D = \|s\|^2 \|h\|^2$ раз хуже по сравнению с согласованным фильтром (СФ), где $\|s\|$ и $\|h\|$ – нормы сигнала и импульсной характеристики (ИХ) инверсного фильтра соответственно. Инверсные фильтры применяются в случаях, когда запаздывающие копии сигнала могут представлять гораздо большую опасность, чем флуктуационные шумы. Значение параметра D позволяет оценить равномерность спектрального состава сигнала. При равномерном распределении спектра сигнала $D = 1$ и эффективности инверсного и согласованного фильтров одинаковы. По мере роста отклонения спектральных компонент сигнала друг от друга параметр D увеличивается. Если хотя бы одна из спектральных компонент обращается в ноль, параметр D стремится к бесконечности. Цель описываемой работы – разработка и исследование подхода к повышению эффективности ИФ.

Мгновенное значение сигнала на выходе линейного фильтра $Y = \{y(n)\}$, $n = 0, 1, \dots, N-1$, есть взвешенная сумма отсчетов сигнала $S = \{s(n)\}$, $n = 0, 1, \dots, N-1$. В качестве весовых коэффициентов выступают отсчеты ИХ фильтра $H = \{h(n)\}$. ИХ согласованного фильтра в матричном виде для случая циклической фильтрации можно представить как

$$H_{\text{СФ}} = \begin{bmatrix} s(N-1) & s(0) & \dots & s(N-2) \\ s(N-2) & s(N-1) & \dots & s(N-3) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s(0) & s(1) & \dots & s(N-1) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Матрица (1) является матрицей Теплица, характеризующейся идентичными элементами на диагоналях, которые параллельны главной диагонали [12]. Структура матрицы $H_{\text{СФ}}$ такова, что каждая ее строка отражает ИХ СФ на отдельных этапах формирования выходного сигнала. При этом под этапом фильтрации понимается временной промежуток образования мгновенного

значения выходного сигнала. Важно отметить циклическую взаимосвязь между ИХ стационарного фильтра на разных этапах обработки. Формирование импульсной характеристики инверсного фильтра основано на операции обращения матрицы $H_{\text{СФ}}$, что математически записывается как $H_{\text{и.ф}} = H_{\text{СФ}}^{-1}$. При этом каждый столбец полученной матрицы $H_{\text{и.ф}}$ представляет собой ИХ стационарного инверсного фильтра на соответствующем этапе фильтрации.

Метод коррекции базиса. Метод основан на коррекции полученной ранее матрицы $H_{\text{СФ}}$ ИХ СФ. Коррекция заключается в добавлении к матрице $H_{\text{СФ}}$ корректирующей матрицы B , содержащей компоненты β_k , $k = 1, 2, \dots, k_{\text{кор}}$, где $k_{\text{кор}}$ – число корректируемых компонент [13–15]:

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 0 & \beta_1 \\ 0 & \dots & 0 & \beta_2 & 0 \\ 0 & \dots & \beta_3 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

При этом $k_{\text{кор}} < N$. В итоге матрица (1) для ИХ СФ преобразуется следующим образом:

$$H_{\text{кор}} = H_{\text{СФ}} + B. \quad (2)$$

Вид корректирующей матрицы B получен эмпирическим путем для примера, рассматриваемого в данной статье, и требует дальнейшего исследования. В результате коррекции нарушается циклическая взаимосвязь между импульсными характеристиками на различных этапах обработки сигнала. Это означает, что матрица (2) описывает ИХ фильтра, квазисогласованного с сигналом S . Чтобы определить импульсную характеристику инверсного фильтра с учетом коррекции, применяется операция обращения матрицы $H_{\text{и.ф.к}} = H_{\text{кор}}^{-1}$.

Каждый столбец матрицы $H_{\text{и.ф.к}}$ представляет собой ИХ инверсного фильтра на отдельных этапах фильтрации. В результате такой операции нарушается циклическая связь между ИХ инверсного фильтра, что делает фильтр нестационарным.

Для повышения эффективности ИФ требуется решить задачу оптимизации выбора параметров коррекции β_k , $k = 1, 2, \dots, k_{\text{кор}}$, исходя из

условия: $\|H_{\text{и.ф.к}}\|_r^2 \rightarrow \min_{\beta_k}$, где $\|H_{\text{и.ф.к}}\|_r^2$ –

квадрат нормы ИХ фильтра на r -м этапе циклической обработки, т. е. квадрат нормы r -го столбца матрицы $H_{\text{и.ф.к}}$. Параметры коррекции β_k рассчитывались методом поиска решения исчерпыванием всевозможных вариантов при ограничении числа корректируемых компонент $k_{\text{кор}}$.

Введем обозначение $A_{m,n}$, $m, n = 0, 1, \dots, N-1$, для алгебраических дополнений элементов $h_{m,n}$ в матрице (2). Союзная матрица для (2) будет иметь вид

$$S_H = \begin{bmatrix} A_{0,0} & A_{0,1} & \dots & A_{0,N-1} \\ A_{1,0} & A_{1,1} & \dots & A_{1,N-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{N-1,0} & A_{N-1,1} & \dots & A_{N-1,N-1} \end{bmatrix}.$$

На основании этого формируем взаимную матрицу к матрице (2):

$$\tilde{H}_{\text{кор}} = S_H^T = \begin{bmatrix} A_{0,0} & A_{1,0} & \dots & A_{N-1,0} \\ A_{0,1} & A_{1,1} & \dots & A_{N-1,1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{0,N-1} & A_{1,N-1} & \dots & A_{N-1,N-1} \end{bmatrix}.$$

Согласно теореме о произведении квадратной матрицы на ее взаимную матрицу:

$$H_{\text{кор}} \tilde{H}_{\text{кор}} = \tilde{H}_{\text{кор}} H_{\text{кор}} = |H_{\text{кор}}| E,$$

где $|H_{\text{кор}}|$ – определитель матрицы (2), а E – единичная матрица. Следовательно, импульсная характеристика инверсного фильтра с коррекцией определяется как

$$H_{\text{и.ф.к}} = H_{\text{кор}}^{-1} = \frac{1}{|H_{\text{кор}}|} \tilde{H}_{\text{кор}}.$$

В матричной форме представление инверсного фильтра можно записать следующим образом:

$$Y_{\text{и.ф}} = S H_{\text{и.ф.к}} = S H_{\text{кор}}^{-1} = \frac{S}{|H_{\text{кор}}|} \tilde{H}_{\text{кор}}.$$

В данном случае сигнал S представлен как матрица-строка. Следовательно, в результате

перемножения матрицы-строки на квадратную матрицу $N \times N$ получим матрицу-строку $Y_{\text{и.ф}}$.

Докажем, что $Y_{\text{и.ф}} = S H_{\text{и.ф.к}} = [0 \ 0 \ \dots \ 1]$.

Для этого составим произведение

$$\begin{aligned} Y_{\text{и.ф}} &= [y_{\text{и.ф}}(0) \ y_{\text{и.ф}}(1) \ \dots \ y_{\text{и.ф}}(N-1)] = \\ &= \frac{S \tilde{H}_{\text{кор}}}{|H_{\text{кор}}|} = \frac{1}{|H_{\text{кор}}|} [s(0) \ s(1) \ \dots \ s(N-1)] \times \\ &\times \begin{bmatrix} A_{0,0} & A_{1,0} & \dots & A_{N-1,0} \\ A_{0,1} & A_{1,1} & \dots & A_{N-1,1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{0,N-1} & A_{1,N-1} & \dots & A_{N-1,N-1} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

В соответствии с правилом умножения матриц имеем:

$$\begin{aligned} y_{\text{и.ф}}(k) &= \\ &= s(0) A_{k,0} + s(1) A_{k,1} + \dots + s(N-1) A_{k,N-1} = \\ &= \sum_{r=0}^{N-1} s(r) A_{k,r}. \end{aligned}$$

Основываясь на свойствах определителя матрицы, в частности, что сумма произведений элементов любой строки (столбца) на их алгебраические дополнения равна определителю матрицы, а сумма произведений элементов одной строки (столбца) на алгебраические дополнения соответственных элементов другой строки (столбца) равны нулю, и учитывая, что в матрице (2) $(N-1)$ -я строка совпадает с матрицей-строкой сигнала S , приходим к следующему выводу:

$$y_{\text{и.ф}}(k) = \begin{cases} |H_{\text{кор}}| & \text{при } k = N-1, \\ 0 & \text{при } k \neq N-1. \end{cases}$$

Отсюда следует:

$$\begin{aligned} Y_{\text{и.ф}} &= S H_{\text{и.ф.к}} = \frac{S}{|H_{\text{кор}}|} \tilde{H}_{\text{кор}} = \\ &= \frac{1}{|H_{\text{кор}}|} [0 \ 0 \ \dots \ |H_{\text{кор}}|] = [0 \ 0 \ \dots \ 1], \end{aligned}$$

что подтверждает верность предположения.

Рассмотрим ситуацию, когда на входе фильтра сигнал $U = \{u(n)\}$, $n = 0, 1, \dots, N-1$, пред-

ставляет собой результат сложения двух сигналов $S = \{s(n)\}$ и $S^d = \{s^d(n)\}$, $n = 0, 1, \dots, N-1$, $d < N$, где d – значение сдвига сигнала, $s^d(n) = s(n+d)$. Докажем, что $Y_{и.ф} = UH_{и.ф.к} = [0 \ 0 \ \dots \ 1 \ 0 \ \dots \ 1]$. При этом положение второго отклика определяется значением сдвига d . Составим произведение

$$Y_{и.ф} = \begin{bmatrix} y_{и.ф}(0) & y_{и.ф}(1) & \dots & y_{и.ф}(N-1) \end{bmatrix} = \frac{U\tilde{H}_{кор}}{|H_{кор}|} = \frac{S\tilde{H}_{кор} + S^d\tilde{H}_{кор}}{|H_{кор}|}.$$

С учетом того, что в матрице $H_{и.ф.к}$ $(N-1)$ -я строка равна матрице-строке сигнала S , а d -я строка равна матрице-строке смещенного сигнала S^d , получим:

$$y(k) = \begin{cases} |H_{кор}| & \text{при } k = N-1 \text{ или } k = d, \\ 0 & \text{при } k \neq N-1. \end{cases}$$

Следовательно:

$$Y_{и.ф} = \frac{1}{|H_{кор}|} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & |H_{кор}| & 0 & \dots & |H_{кор}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix},$$

что и требовалось доказать. Однако для получения такого результата следует наложить ограничение $d < N - k_{кор}$. Данное ограничение связано с изменениями алгебраических дополнений элементов матрицы $H_{и.ф.к}$ при проведении корректировки.

Эффективность инверсной фильтрации с коррекцией базиса. Для исследования эффективности метода ИФ с коррекцией базиса разработано программное обеспечение. Исследование проводилось для дискретного импульсного сигнала с треугольной симметричной формой длительностью 30 отсчетов. На рис. 1 представлены результаты циклической ИФ сигнала без коррекции (рис. 1, а) и с коррекцией базиса (рис. 1, б), а на рис. 2 – для группового сигнала, представляющего собой сумму двух сигналов. При этом временной сдвиг между сигналами составлял 14 отсчетов (0.47 от эле-

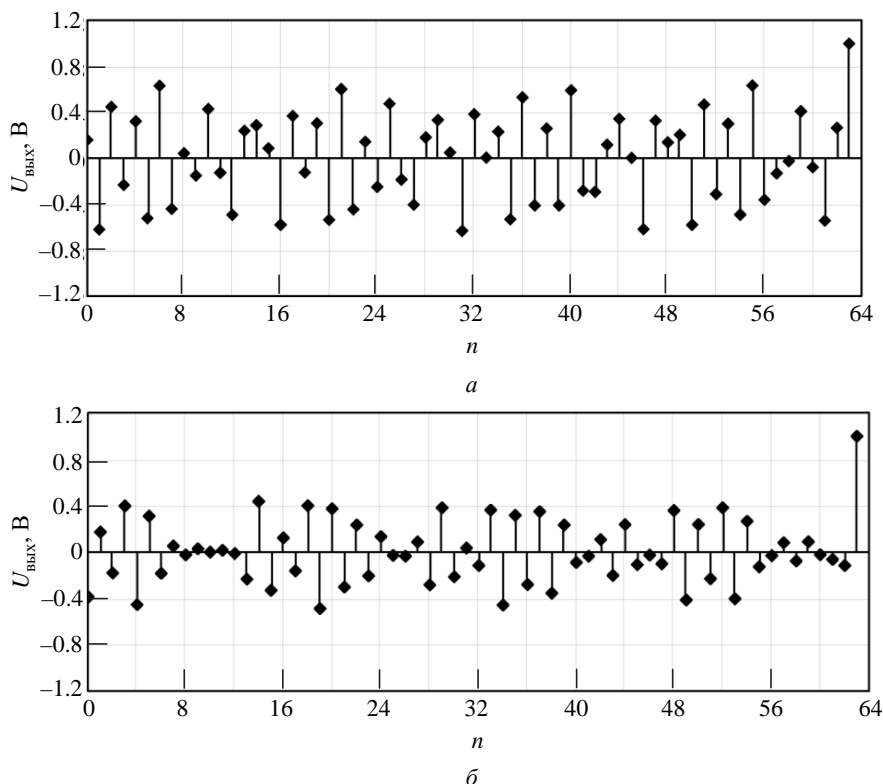


Рис. 1. Результат циклической ИФ сигнала треугольной формы: а – без коррекции; б – с коррекцией

Fig. 1. Result of cyclic IF of a triangular-shaped signal: а – without correction; б – with correction

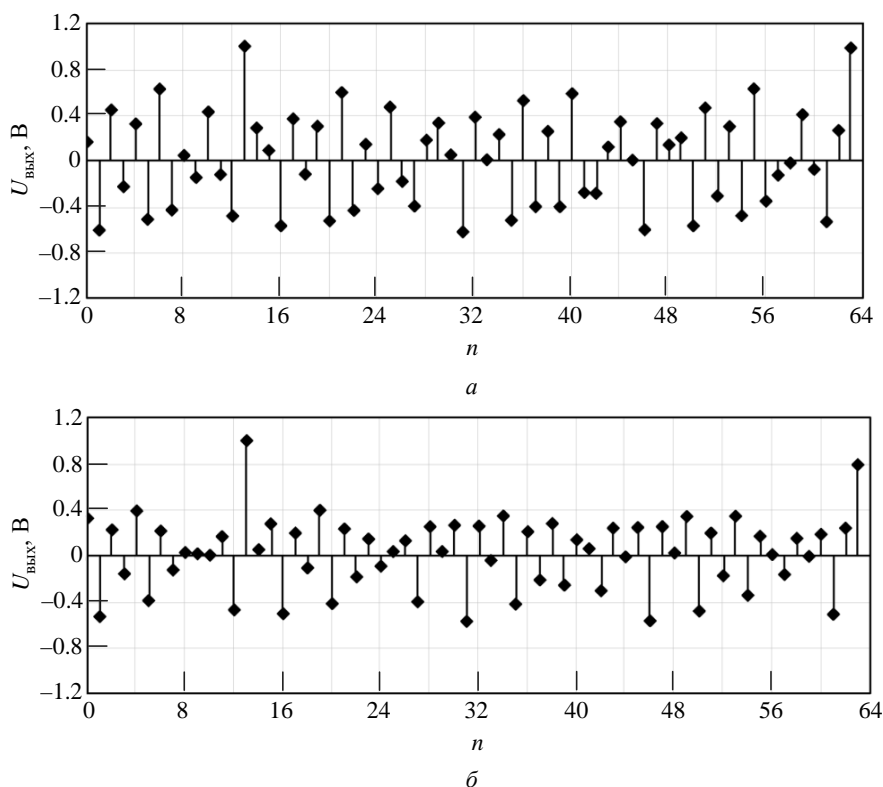


Рис. 2. Результат циклической ИФ для группового сигнала: а – без коррекции; б – с коррекцией
Fig. 2. Result of cyclic IF for a group signal is: а – without correction; б – with correction

евского предела). В данном случае заданы следующие параметры коррекции: $\beta_1 = -8$, $\beta_2 = -2$, $\beta_3 = -2$. ОСШ на входе составляло 46 дБ. Результаты ИФ с коррекцией представлены на рис. 1, б и рис. 2, б.

Анализ экспериментальных исследований (рис. 1 и 2) позволяет сделать вывод, что применение коррекции при ИФ сигналов сохраняет способность инверсного фильтра разрешать сигналы при перекрытии, меньшем рэлеевского предела. Кроме того, даже визуально можно отметить уменьшение дисперсии шума.

Проведено исследование эффективности метода ИФ с использованием коррекции базиса. При расчете ОСШ на выходе инверсного фильтра предполагается, что мощность сигнала равна единице: $P_{\Sigma} = 1$. Тогда получаем следующее выражение для ОСШ, дБ:

$$q_{\text{вых}} = 10 \lg \left(\frac{1}{P_{\text{ш}}} \right),$$

а мощность шума прямо пропорциональна квадрату нормы ИХ фильтра:

$$P_{\text{ш}} = \sigma_{\text{вых}}^2 = \sigma_{\text{вх}}^2 \|H_{\text{и.ф}}\|^2,$$

где $\sigma_{\text{вх}}^2$ – дисперсия входного шума. Тогда отношение сигнал/шум на выходе ИФ, дБ:

$$q_{\text{вых}} = 10 \lg \left(\frac{1}{\sigma_{\text{вх}}^2 \|H_{\text{и.ф}}\|^2} \right).$$

При использовании метода ИФ с коррекцией базиса квадрат нормы ИХ фильтра $\|H_{\text{и.ф.к}}\|_r^2$ принимает разные значения на каждом r -м этапе циклической обработки. Мощность выходного шума определим как среднее значение по всем этапам фильтрации:

$$\overline{\sigma_{\text{вых}}^2} = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} \sigma_{\text{вых}, r}^2.$$

Таким образом, при работе с нестационарным инверсным фильтром возникает необходимость введения нового понятия – среднего значения квадрата нормы ИХ фильтра:

$$\overline{\|H_{\text{и.ф.к}}\|^2} = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} \|H_{\text{и.ф.к}}\|_r^2. \quad (3)$$

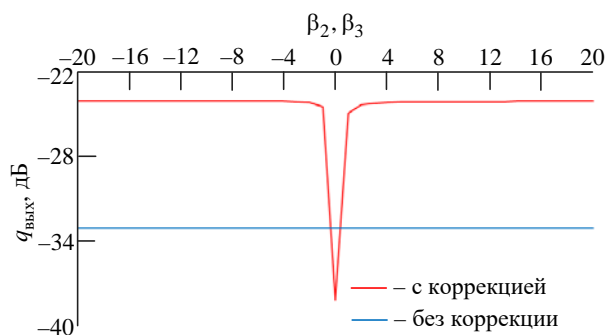


Рис. 3. Влияние корректирующих параметров β_2 и β_3 на ОСШ в выходном сигнале инверсного фильтра при $\beta_1 = -8$

Fig. 3. Effect of correction parameters β_2 and β_3 on the SNR in the IF output signal at $\beta_1 = -8$

Например, при входном ОСШ по мощности $q_{\text{вх}} = 15.5$ дБ выходной показатель ОСШ для инверсного фильтра без коррекции составляет $q_{\text{вых}} = -33$ дБ, тогда как для СФ он достигает 33.5 дБ. Таким образом, разница в эффективности $D = 66.5$ дБ.

На рис. 3 показано, как изменение параметров коррекции β_2 и β_3 при $\beta_1 = -8$ влияет на выходное ОСШ при заданных условиях фильтрации. Для оценки дисперсии шума на выходе фильтра применяется средний квадрат нормы ИХ инверсного фильтра (3).

Таким образом, использование метода коррекции базиса приводит к повышению ОСШ на выходе инверсного фильтра. В результате коррекции с параметрами $\beta_1 = -8$, $\beta_2, \beta_3 < -3$ и $\beta_2, \beta_3 > 6$ достигается значение ОСШ в -24 дБ, что значительно превышает исходный показатель. При этом потери D между инверсным и согласованным фильтрами сокращаются до 57.5 дБ, что расширяет возможности применения инверсного фильтра при работе с входными сигналами, имеющими низкое ОСШ.

Задача разрешения сигналов решается, как правило, после обнаружения группового сигнала. Таким образом, имеется возможность обеспечить синхронизацию и изменение характеристик фильтра в соответствии с положением окна фильтра. На рис. 4 представлен вариант реализации инверсного фильтра с коррекцией для решения задачи разрешения сигналов.

После обнаружения группового сигнала в блоке обнаружения, состоящем из СФ и порогового устройства ПУ, запускается генератор тактовых импульсов ГТИ, синхронизирующих работу инверсного фильтра. На вход инверсного фильтра с коррекцией подается сигнал с выхода СФ, задержанный на N отсчетов. Окно обработки сигнала в инверсном фильтре выбирается равным $2N$ и более, чтобы иметь возможность обрабатывать перекрывающиеся сигналы. На рис. 1 и 2 окно обработки сигнала составляло 64 при длительности сигнала 30 отсчетов, что позволяло обрабатывать перекрывающиеся сигналы.

Сигнал с выхода инверсного фильтра поступает на вход блока контроля уровня сигнала, один из выходов которого служит для управления блоком задержки сигнала. Непосредственно сам инверсный фильтр может быть реализован по схеме нерекурсивного цифрового фильтра на основе дискретной свертки или дискретного преобразования Фурье.

Заключение. Представлен подход к повышению эффективности ИФ с помощью метода коррекции базиса. В основе метода – введение корректирующего компонента на каждом этапе процесса фильтрации. При этом нарушается циклическая связь между ИХ фильтра на каждом из этапов циклической фильтрации, что приводит к нестационарности фильтра. Введено понятие – средний квадрат нормы ИХ фильтра.

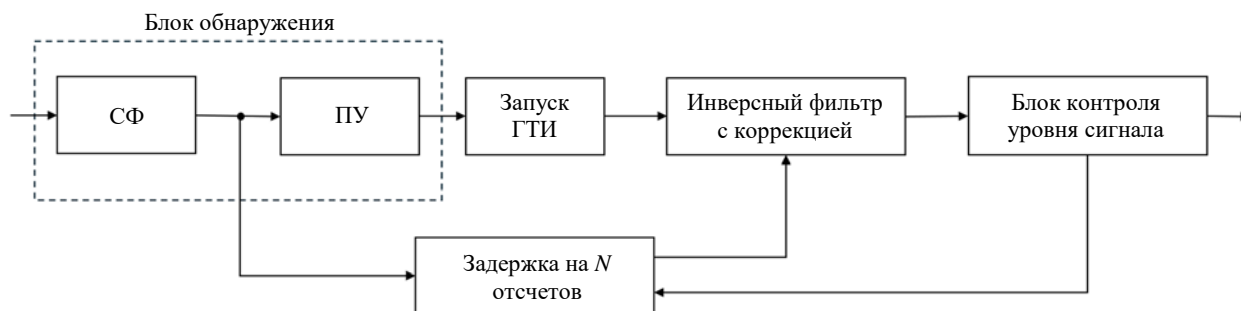


Рис. 4. Структура реализации ИФ с коррекцией

Fig. 4. Structure of IF implementation with correction

Показано, что применение метода коррекции базиса позволяет увеличить ОСШ на выходе инверсного фильтра. Например, при входном ОСШ = 15.5 дБ выходной показатель ОСШ без коррекции составляет –32 дБ, тогда как при использовании коррекции с определенными параметрами он достигает практически –24 дБ. В результате потери D между инверсным и согласованным фильтрами сокра-

щаются, что обеспечивает возможность применения ИФ при меньших значениях ОСШ на входе фильтра. Введено ограничение на размер сдвига между сигналами в составе группового сигнала при решении задачи разрешения сигналов с использованием инверсного фильтра с коррекцией. Предложен подход к реализации инверсного фильтра с коррекцией для решения задачи разрешения сигналов.

Авторский вклад

Хафизов Ринат Гафиятуллович – постановка задачи; разработка подхода.

Егошина Ирина Лазаревна – обработка результатов вычислительного эксперимента.

Мертвищев Александр Сергеевич – реализация вычислительного эксперимента.

Хамарицкая Олеся Алексеевна – реализация вычислительного эксперимента.

Author's contribution

Rinat G. Khafizov, problem formulation; approach development.

Irina L. Egoshina, processing of computational experiment results.

Alexander S. Mertvishchev, implementation of the computational experiment.

Olesya A. Hamaritskaya, implementation of the computational experiment.

Список литературы

1. Чижов А. А. Сверхрешающее разрешение: в 2 т. Т. 1: Классический взгляд на проблему. М.: URSS, 2010. 96 с.

2. Schneider M., Habets E. A. P. Iterative DFT-Domain Inverse Filter Optimization Using a Weighted Least-Squares Criterion // IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing. 2019. Vol. 27, № 12. P. 1957–1969. doi: 10.1109/TASLP.2019.2936385

3. Super-resolution surface mapping for scanning radar: inverse filtering based on the fast iterative adaptive approach / Yo. Zhang, Yin Zhang, W. Li, Yu. Huang, J. Yang // IEEE transactions on geoscience and remote sensing. 2018. Vol. 56, № 1. P. 127–144. doi: 10.1109/TGRS.2017.2743263

4. Nelander A. Processing for continuous radar waveforms // Intern. Waveform Diversity & Design Conf. Edinburgh, UK, 08–10 Nov. 2004. IEEE, 2004. P. 1–5. doi: 10.1109/IWDDC.2004.8317557

5. Семченков С. М., Печенев Е. А., Абраменков А. В. Повышение разрешающей способности радиолокатора по дальности за счет инверсной фильтрации // Журн. СФУ. Техника и технологии. 2018. Vol. 11, № 3. P. 301–312.

6. Практическое применение алгоритма инверсной фильтрации в обработке радиолокационных сигналов / М. Т. Балдычев, П. Е. Петухов, Ю. М. Авдони-на, К. И. Чеботарь // Электромагнитные волны и электронные системы. 2020. Т. 25, № 6. С. 38–44. doi: 10.18127/j15604128-202006-05

7. Инверсная фильтрация импульсных сигналов / В. В. Абраменков, О. В. Васильченко, С. М. Семченков, Е. А. Печенев // Электромагнитные волны и электронные системы. 2017. № 4. С. 42–53.

8. Семченков С. М., Печенев Е. А. Способ повышения разрешающей способности за счет инверсной фильтрации импульсных сигналов // Радиопромышленность. 2017. № 3. С. 103–109.

9. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.

10. Кревецкий А. В., Мельников А. Д. Разрешение обнаружение сигналов на базе сопряженных согласованных фильтров // Радиотехника. 2007. № 4. С. 3–8.

11. Кревецкий А. В., Мельников А. Д., Евдокимов А. О. Обнаружение периодических ФМ радиосигналов с использованием сопряженного согласованного фильтра // Радиотехника. 2003. № 5. С. 11–16.

12. Gray R. M. Toeplitz and Circulant Matrices: A Review // Foundations and Trends in Communications and Information Theory. 2006. Vol. 2, № 3. P. 155–239. doi:10.1561/0100000006

13. Применение метода коррекции базиса для устранения неопределенности при синтезе инверсного фильтра / Р. Г. Хафизов, Е. А. Григорьевых, Е. С. Памутова, М. С. Соколова, А. М. Масликов // Журн. радиоэлектроники [электрон. журн.]. 2022. № 12. doi: 10.30898/1684-1719.2022.12.6

14. Хафизов Р. Г., Салихова Л. М., Мертвищев А. С. Нестационарный инверсный фильтр // Журн. радиоэлектроники [электрон. журн.]. 2024. № 9. doi: 10.30898/1684-1719.2024.9.7

15. Григорьевых Е. А., Хафизов Р. Г., Мелешко А. В. Расчет характеристик обнаружения сигналов для приемника на базе инверсного фильтра в условиях неопределенности // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2023. № 4. С. 51–58.

Информация об авторах

Хафизов Ринат Гафиятуллович – доктор технических наук (2010), профессор (2013), заведующий кафедрой радиотехнических и медико-биологических систем Поволжского государственного технологического университета. **Повышение эффективности инверсной фильтрации сигналов на основе метода коррекции базиса** Improving the Efficiency of Inverse Signal Filtering by Basis Correction Method

университета. Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка радиолокационных сигналов; распознавание образов и анализ сцен.

Адрес: Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, Йошкар-Ола, 424000, Россия

E-mail: hafizovrg@volgatech.net

<https://orcid.org/0000-0001-9824-2021>

Егошина Ирина Лазаревна – доктор технических наук (2013), доцент (2002), профессор кафедры радиотехнических и медико-биологических систем Поволжского государственного технологического университета. Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – распознавание образов и анализ сцен; цифровая обработка радиолокационных сигналов.

Адрес: Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, Йошкар-Ола, 424000, Россия

E-mail: egoshinail@volgatech.net

<https://orcid.org/0000-0002-2857-8977>

Мертвищев Александр Сергеевич – специалист по направлению "Радиоэлектронные системы и комплексы" (Поволжский государственный технологический университет, 2023), аспирант кафедры радиотехнических и медико-биологических систем Поволжского государственного технологического университета. Автор четырех научных публикаций. Сфера научных интересов: радиолокация.

Адрес: Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, Йошкар-Ола, 424000, Россия

E-mail: AMS2605@ya.ru

<https://orcid.org/0009-0005-4127-7748>

Хамарицкая Олеся Алексеевна – студентка Поволжского государственного технологического университета, обучающаяся по специальности "Радиоэлектронные системы и комплексы". Автор 12 научных публикаций. Сфера научных интересов: цифровая обработка радиолокационных сигналов.

Адрес: Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, Йошкар-Ола, 424000, Россия

E-mail: HamaritskayaOA@volgatech.net

<https://orcid.org/0009-0004-0371-6861>

References

1. Chizhov A. A. *Sverkhreleevskoe razreshenie: T. 1. Klassicheskiy vzglyad na problem* [Super-Rayleigh Resolution: Vol. 1. A Classical View of the Problem]. Moscow, URSS, 2010, 96 p. (In Russ.)
2. Schneider M., Habets E. A. P. Iterative DFT-Domain Inverse Filter Optimization Using a Weighted Least-Squares Criterion. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing*. 2019, vol. 27, no. 12, pp. 1957–1969. doi: 10.1109/TASLP.2019.2936385
3. Zhang Yo., Zhang Yin, Li W., Huang Yu., Yang J. Super-Resolution Surface Mapping for Scanning Radar: Inverse Filtering Based on the Fast Iterative Adaptive Approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2018, vol. 56, no. 1, pp. 127–144. doi: 10.1109/TGRS.2017.2743263
4. Nelander A. Processing for Continuous Radar Waveforms. *Intern. Waveform Diversity & Design Conf.* Edinburgh, UK, 08–10 Nov. 2004. IEEE, 2004, pp. 1–5. doi: 10.1109/TWDDC.2004.8317557
5. Semchenkov S. M., Pechenev E. A., Abramnikov A. V. The Radar Range Resolution Increasing with Inverse Filtration Using. *J. of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2018, vol. 11, no. 3, pp. 301–312. (In Russ.) doi: 10.17516/1999-494X-0042
6. Baldytchev M. T., Petukhov P. E., Avdonina Yu. M., Chebotar K. I. Practical Application of the Inverse Filtering Algorithm in Radar Signal Processing. *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. 2020, vol. 25, no. 6, pp. 38–44. (In Russ.) doi: 10.18127/j15604128-202006-05
7. Abramnikov V. V., Vasilchenko O. V., Semchenkov S. M., Pechenev E. A. The Inverse Filtering of Pulse Signals. *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. 2017, vol. 22, no. 4, pp. 42–53. (In Russ.)
8. Semchenkov S. M., Pechenev E. A. Method for Improving Resolution Through Inverse Filtering of Pulse Signals. *Radio Industry*. 2017, no. 3, pp. 103–109. (In Russ.)
9. Gonzalez R., Woods R. *Digital Image Processing*. 2nd Ed. New Jersey, Prentice Hall, 2002, 793 p.
10. Krevetsky A. V., Melnikov A. D. The Signals Resolution-Detection on the Basis of the Conjugated Matched Filters. *Radioengineering*. 2007, no. 4, pp. 3–8. (In Russ.)
11. Krevetsky A. V., Melnikov A. D., Evdokimov A. O. Detection of Periodic FM Radio Signals Using a Conjugate Matched Filter. *Radiotekhnika*. 2003, no. 5, pp. 11–16. (In Russ.)
12. Gray R. M. Toeplitz and Circulant Matrices: A Review. *Foundations and Trends in Communications and Information Theory*. 2006, vol. 2, no. 3, pp. 155–239. doi:10.1561/0100000006
13. Khafizov R. G., Grigoryevykh E. A., Pakhmutova E. S., Sokolova M. S., Maslikov A. M. Application of the Basis Correction Method to Remove Uncertainty in the Synthesis of an Inverse Filter. *J. of Radio Electronics* [online]. 2022, no. 12. (In Russ.) doi: 10.30898/1684-1719.2022.12.6
14. Khafizov R. G., Salikhova L. M., Mertvishev A. S. Nonstationary Inverse Filter. *J. of Radio Electronics* [online]. 2024, no. 9. (In Russ.) doi: 10.30898/1684-1719.2024.9.7
15. Grigorievikh E. A., Khafizov R. G., Meleshko A. V. Calculation of Signal Detection Characteristics for a Receiver Based on an Inverse Filter Under Conditions of Uncertainty. *Radio Engineering and Telecommunication Systems*. 2023, no. 4, pp. 51–58. (In Russ.)

Information about the authors

Rinat G. Khafizov, Dr Sci. (Eng.) (2010), Professor (2013). Head of the Department of Radio Engineering and Biomedical Systems of Volga State University of Technology. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: digital processing of radar signals; pattern recognition and scene analysis.

Address: Volga State University of Technology, 3, Lenin Square, Yoshkar-Ola 424000, Russia

E-mail: hafizovrg@volgatech.net

<https://orcid.org/0000-0001-9824-2021>

Irina L. Egoshina, Dr Sci. (Eng.) (2013), Associate Professor (2002). Professor of the Department of Radio Engineering and Biomedical Systems of Volga State University of Technology. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: pattern recognition and scene analysis; digital processing of radar signals.

Address: Volga State University of Technology, 3, Lenin Square, Yoshkar-Ola 424000, Russia

E-mail: egoshinail@volgatech.net

<https://orcid.org/0000-0002-2857-8977>

Alexander S. Mervishchev, Specialist in "Radioelectronic systems and complexes" (Volga State University of Technology, 2023), a Postgraduate student at the Department of "Radiotechnical and Biomedical Systems" of Volga State University of Technology. The author of 4 scientific publications. Area of expertise: radiolocation.

Address: Volga State University of Technology, 3, Lenin Square, Yoshkar-Ola 424000, Russia

E-mail: AMS2605@ya.ru

<https://orcid.org/0009-0005-4127-7748>

Olesya A. Hamaritskaya, Student of Volga State University of Technology, studying the specialty "Radioelectronic Systems and Complexes". The author of 12 scientific publications. Area of expertise: digital processing of radar signals.

Address: Volga State University of Technology, 3, Lenin Square, Yoshkar-Ola 424000, Russia

E-mail: HamaritskayaOA@volgatech.net

<https://orcid.org/0009-0004-0371-6861>
