

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖЕКТОРНЫХ ФИЛЬТРОВ ПРИ ВОБУЛЯЦИИ ПЕРИОДА ПОВТОРЕНИЯ

Попов Д.И., д.т.н., профессор кафедры радиотехнических систем Рязанского государственного радиотехнического университета, e-mail: adop@mail.ru

OPTIMIZATION OF REJECTION FILTERS WHEN WOBBLING THE REPETITION PERIOD

Popov D.I.

Non-recursive rejection filters with weighting coefficients optimized for the case of processing a wobbling sequence in the range of a possible change in the width of the interference spectrum are considered. The criterion of optimization of the vector of the weight coefficients of the rejection filter is given, which ensures the maximum coefficient of improvement of the signal-to-noise ratio in each period of the wobbling sequence. The application of the minimax principle to the magnitude of relative losses in marginal efficiency leads to the determination of a weight vector in each period of repetition, in which minimal losses are provided over the entire optimization range compared to optimal processing. The numerical results of optimization are given, from which it follows that the vector of weight coefficients in each period is asymmetric and varies from period to period. For different values of the noise/clutter ratio, the gains in marginal efficiency provided by a filter with optimized weighting coefficients compared to known non-optimized coefficients are determined. The principles of implementing an optimized filter based on a system function in the form of cascading inclusion of 1st and 2nd order links with time-variable weighting coefficients are considered, and a block diagram of the filter with partial adaptation to the Doppler phase of passive clutter and switching from period to period of weighting coefficients is presented. According to the criterion determining the effectiveness of interference suppression, a comparative analysis of the effectiveness of optimized filters was carried out and the volume of the training sample was estimated in case of their adaptation to the Doppler phase of clutter.

Key words: adaptation, weight vector, repetition period wobble, minimax criterion, optimization, clutter, rejection filter.

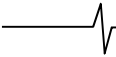
Ключевые слова: адаптация, весовой вектор, вобуляция периода повторения, минимаксный критерий, оптимизация, пассивная помеха, режекторный фильтр.

Введение

При обнаружении сигналов движущихся целей на фоне пассивных помех, создаваемых мешающими отражениями от неподвижных или медленно перемещающихся объектов, основной операцией является режектирование спектральных составляющих помехи [1-4]. Априорная неопределенность спектрально-корреляционных характеристик помехи, а также их неоднородность и нестационарность в зоне обзора затрудняют реализацию эффективной защиты от пассивных помех. Преодоление априорной неопределенности параметров помехи основывается на методах адаптации к неизвестным корреляционным параметрам помехи, что приводит, в частности, к алгоритмам адаптивного режектирования помехи с комплексными весовыми коэффициентами и соответствующим адаптивным режекторным фильтрам (АРФ) [5]. Реализация данных АРФ в цифровом виде требует высокого быстродействия выполнения арифметических операций. Избежать указанных трудностей можно путем предварительной компенсации доплеровского сдвига фазы помехи. В работах [6, 7] синтезированы алгоритмы оценивания и предложены принципы построения и структурные схемы автокомпенсаторов доплеровской фазы пассивных помех с прямой и обрат-

Рассмотрены нерекурсивные режекторные фильтры с весовыми коэффициентами, оптимизированными для случая обработки вобулированной последовательности в диапазоне возможного изменения ширины спектра помехи. Приведен критерий оптимизации вектора весовых коэффициентов режекторного фильтра, обеспечивающий максимум коэффициента улучшения отношения сигнал/помеха в каждом периоде вобулированной последовательности. Применение минимаксного принципа к величине относительных потерь в предельной эффективности приводит к определению в каждом периоде повторения весового вектора, при котором во всем диапазоне оптимизации обеспечиваются минимальные потери по сравнению с оптимальной обработкой. Приведены числовые результаты оптимизации, из которых следует, что вектор весовых коэффициентов в каждом периоде является несимметричным и изменяется от периода к периоду. Для различных значений отношения шум/помеха определены выигрыши в предельной эффективности, обеспечиваемые фильтром с оптимизированными весовыми коэффициентами по сравнению с известными неоптимизированными коэффициентами. Рассмотрены принципы реализации оптимизированного фильтра на основе системной функции в виде каскадного включения звеньев 1-го и 2-го порядков, обладающих переменными во времени весовыми коэффициентами, и представлена структурная схема фильтра с частичной адаптацией к доплеровской фазе пассивной помехи и коммутацией от периода к периоду весовых коэффициентов. По критерию, определяющего эффективность подавления помехи, проведен сравнительный анализ эффективности оптимизированных фильтров и оценен объем обучающей выборки в случае их адаптации к доплеровской фазе помехи.

ной связью. Особенности адаптации к корреляционным свойствам помехи на выходе автокомпенсатора и последующего ее режектирования рассмотрены в работе [8]. Определенное упрощение процедуры адаптации достигается в АРФ каскадного типа [9]. Другим вариантом упрощения процедуры адаптации является переход от комплексных весовых коэффициентов к действительным,



что ограничивает область целесообразного применения соответствующих АРФ при ограниченной и сравнительно малой в зависимости от порядка фильтра и ожидаемых параметров помехи величине ее доплеровской скорости [10]. Компромиссное решение достигается в фильтрах с частичной адаптацией к доплеровской фазе помехи и оптимизацией характеристик режекторных фильтров в априорном диапазоне изменения спектрально-корреляционных параметров помехи [11]. Повышение эффективности режекторных фильтров высоких порядков достигается при оптимизации их параметров по вероятностному критерию [12].

Кроме того, эффективная селекция сигналов движущихся целей невозможна при так называемых слепых скоростях цели, когда спектральные линии сигнала и помехи совпадают. Одним из способов борьбы со слепыми скоростями является вобуляция периода повторения зондирующих импульсов [4, 13]. Однако при стационарных параметрах фильтра данный метод приводит к деформации его скоростных характеристик в зоне режекции, что существенно снижает эффективность выделения сигнала от цели на фоне пассивной помехи.

В работе [14] синтезированы нерекурсивные адаптивные режекторные фильтры с переменными во времени комплексными весовыми коэффициентами, позволяющими при вобуляции периода повторения получить предельную эффективность подавления пассивной помехи с неизвестными спектрально-корреляционными свойствами. Сложность предложенных алгоритмов значительно затрудняет их реализацию.

Существенно упростить структуру АРФ позволяет переход от комплексных весовых коэффициентов к действительным [10]. При этом для адаптации фильтра необходима оценка только действительных частей коэффициентов межпериодной корреляции. Однако областью целесообразного использования АРФ с действительными весовыми коэффициентами является компенсация пассивных помех с малыми значениями доплеровской фазы.

При произвольных значениях доплеровской фазы помехи необходимым условием эффективного режектирования является обеспечение адаптации фильтра к центральной частоте спектра помехи. Применение наряду с компенсацией доплеровского сдвига фазы, определяемого центральной частотой спектра помехи [11], весовых коэффициентов, оптимизированных по заданному критерию в априорно известном диапазоне изменения спектрально-корреляционных свойств помехи, дает возможность перейти от полной адаптации фильтра к частичной. Такой подход позволяет существенно упростить структуру системы селекции движущихся целей.

Таким образом, представляет интерес рассмотрение в условиях обработки вобулированной последовательности фильтров, обеспечивающих адаптацию к доплеровской фазе помехи, с весовыми коэффициентами, оптимизированными в априорно известном диапазоне изменения спектрально-корреляционных свойств помехи по заданному критерию (фильтры с частичной адаптацией).

Критерий оптимизации режекторных фильтров

В общем случае для произвольного значения нормированной ширины спектра помехи β_n оптимальный вектор весовых коэффициентов $\mathbf{G}_l = \{G_k^{(l)}\}$, $k = \overline{0, m}$, выбирается по критерию максимума коэффициента улучшения отношения сигнал/помеха в каждом l -м периоде повторения:

$$\mu_l = \max_{\mathbf{G}_l} (\mathbf{G}_l^T \mathbf{G}_l / \mathbf{G}_l^T \mathbf{R}_l \mathbf{G}_l), \quad (1)$$

где $\mathbf{R}_l$ – корреляционная матрица помехи с элементами вида $R_{jk}^{(l)} = \rho_{jk}^{(l)} \exp(i\varphi_{jk}^{(l)}) + \gamma \delta_{jk}$, $\rho_{jk}^{(l)} = \rho(t_{l-j} - t_{l-k})$ – модули коэффициентов корреляции, $\varphi_{jk}^{(l)} = \varphi(t_{l-j} - t_{l-k})$ – фазовый сдвиг помехи за интервал времени $t_{l-j} - t_{l-k}$, δ_{jk} – символ Кронекера, γ – отношение шум/помеха на входе фильтра, символы T и $*$ означают транспонирование и комплексное сопряжение соответственно.

Из экстремальных свойств характеристических чисел матриц следует, что минимумом отношения Релея в (1) является минимальное собственное число $\alpha_{\min}^{(l)}$ матрицы $\mathbf{R}_l$. Достижение нерекурсивным режекторным фильтром предельной эффективности подавления пассивной помехи $\mu_{\max}^{(l)} = (\alpha_{\min}^{(l)} + \gamma)^{-1}$ возможно при оптимальном векторе $\mathbf{G}_l$, который не зависит от γ и находится как собственный вектор матрицы $\mathbf{R}_l$, соответствующий $\alpha_{\min}^{(l)}$, в виде

$$\{G_k^{(l)}\} = \left\{ g_k^{(l)} \exp \left(i \sum_{s=0}^{k-1} \varphi_s^{(l)} \right) \right\},$$

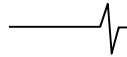
где коэффициенты $g_k^{(l)}$ определяются согласно алгоритмам работы [14] коэффициентами $\rho_{jk}^{(l)}$, которые, являясь скалярными величинами, при известной форме корреляционной функции помехи могут быть описаны нормированной шириной спектра β_n .

В условиях априорной параметрической неопределенности необходимым условием использования алгоритмов работы [14] является определение оценок $\hat{\rho}_{jk}^{(l)}$, необходимость в которых при оптимизации фильтра в соответствии с некоторым выбираемым критерием в известном диапазоне изменения спектрально-корреляционных свойств помехи отпадает.

В качестве решающего применим минимаксное правило решения. В рассматриваемой задаче такой подход приводит к некоторому значению $\beta = \tilde{\beta}$, которое соответствует вектору весовых коэффициентов $\tilde{\mathbf{g}}_l$ и определяется путем применения минимаксного принципа к величине относительных потерь в предельной эффективности:

$$\delta \mu^{(l)}(\beta_{\min}, \tilde{\beta}) = \mu^{(l)}(\mathbf{g}_l, \beta_{\min}) / \tilde{\mu}^{(l)}(\tilde{\mathbf{g}}_l, \beta_{\min}),$$

где $\beta_{\min}$ – нормированная ширина спектра помехи в минимальном периоде повторения в пределах ядра вобуляции P , $\mu^{(l)}(\mathbf{g}_l, \beta_{\min})$ – эффективность нерекур-



сивного фильтра при оптимизации вектора $\mathbf{g}_l$ по критерию (1) для некоторой ширины спектра помехи $\beta_{\min}$, $\tilde{\mu}^{(l)}(\tilde{\mathbf{g}}_l, \beta_{\min})$ – эффективность фильтра при той же ширине спектра помехи $\beta_{\min}$, но при оптимизации весового вектора $\mathbf{g}_l = \tilde{\mathbf{g}}_l$ в соответствии с некоторым значением $\beta_{\min} = \tilde{\beta}$.

Критерий выбора величины $\tilde{\beta}$ в соответствии с принципом минимакса может быть представлен в аналогичном работам [11, 15] виде:

$$\min_{\beta} \max_{\beta_{\min}} \delta \mu^{(l)}(\beta_{\min}, \tilde{\beta}) \leq \max_{\beta_{\min}} \delta \mu^{(l)}(\beta_{\min}, \tilde{\beta}). \quad (2)$$

Для реализации этого критерия необходимы априорные данные о возможном интервале $\Delta \beta_{\pi}$ изменения нормированной ширины спектра помехи, одномерный поиск в пределах которого приводит к искомому значению $\tilde{\beta}$, которое в l -м периоде повторения при известной форме корреляционной функции помехи определяет матрицу $\{\tilde{r}_{jk}^{(l)}\}$. Весовой вектор $\tilde{\mathbf{g}}_l$ в каждом периоде повторения находится согласно алгоритмам [14]. Таким образом, оптимизация нерекурсивного режекторного фильтра в диапазоне $\Delta \beta_{\pi}$ при вобуляции периода повторения заключается в определении в каждом периоде повторения весового вектора, при котором во всем диапазоне оптимизации обеспечиваются минимальные потери по сравнению с оптимальной обработкой [14].

Результаты оптимизации

По предлагаемой методике была произведена оптимизация весовых коэффициентов нерекурсивного режекторного фильтра порядка $m=3$ для гауссовской аппроксимации спектра помехи в различных априорных интервалах $\Delta \beta$ в случае линейной вобуляции с глубиной модуляции 60 % и ядром $P=8$. Табл. 1 содержит значения $\tilde{\beta}$ для $\gamma=10^{-6}$ при различных значениях границ диапазона оптимизации ($\beta_{\min}$, $\beta_{\max}$ – соответственно нижняя и верхняя границы диапазона оптимизации).

Таблица 1

$\beta_{\max}$	$\beta_{\min}$			
	0,05	0,06	0,08	0,1
0,16	0,064	0,076	0,098	0,116
0,18	0,064	0,076	0,098	0,118
0,2	0,064	0,076	0,098	0,12
0,22	0,064	0,076	0,098	0,12

Из табл. 1 следует, что определяющее влияние на получаемую величину $\tilde{\beta}$ оказывает нижняя граница диапазона оптимизации.

Табл. 2 содержит весовые коэффициенты, полученные при оптимизации в априорном интервале $\beta_{\pi} = 0,05 \dots 0,2$ при $\gamma = 10^{-6}$. Как видим, вектор весовых коэффициентов в каждом периоде является несимметричным и изменяется от периода к периоду.

На рис. 1 представлены выигрыши $\Delta \mu$ в предельной эффективности, обеспечиваемые фильтром с оп-

тимизированными по критерию (2) весовыми коэффициентами (табл. 2) по сравнению с коэффициентами по алгоритмам, приведенным в справочнике [4]. Кривые 1, 2, 3 соответствуют значениям $\gamma = 10^{-6}$ ($\tilde{\beta} = 0,064$), 10^{-4} ($\tilde{\beta} = 0,09$), 10^{-2} ($\tilde{\beta} = 0,155$). При этом в пределах диапазона оптимизации $\beta_{\pi} = 0,05 \dots 0,2$ возникают потери оптимизированного по критерию (2) алгоритма по сравнению с оптимальным по критерию (1) при различных отношениях шум/помеха ($\gamma = 10^{-6}$, 10^{-4} , 10^{-2}). Как следует из рис. 1, с увеличением отношения шум/помеха γ происходит рост интервала изменения β_{π} , соответствующего выигрышам.

Таблица 2

l	$\tilde{g}_0^{(l)}$	$\tilde{g}_1^{(l)}$	$\tilde{g}_2^{(l)}$	$\tilde{g}_3^{(l)}$
3	1	-3,028	3,164	1,135
4	1	-3,01	3,136	1,126
5	1	-2,992	3,11	1,117
6	1	-2,975	3,084	1,109
7	1	-2,958	3,06	1,101
8	1	-2,94	3,035	1,094
9	1	-2,29	1,956	0,666
10	1	-2,851	2,519	0,667

Это можно объяснить тем, что увеличение отношения шум/помеха приводит к уменьшению потерь по сравнению с оптимальным по критерию (1) алгоритмом обработки. Очевидно также, что сокращение интервала оптимизации $\Delta \beta_{\pi}$ также позволяет снизить рассматриваемые проигрыши.

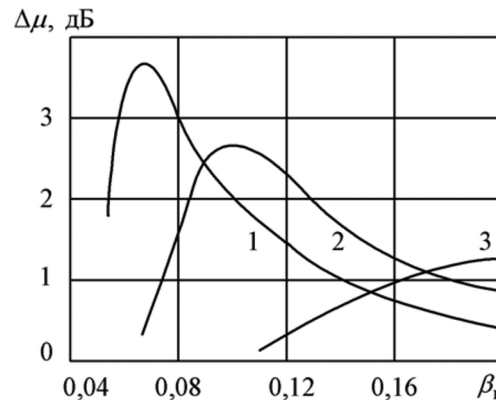


Рис. 1. Зависимости выигрышей в эффективности фильтра с оптимизированными весовыми коэффициентами

Принципы реализации и структурная схема оптимизированного фильтра

Реализация оптимизированного фильтра может быть осуществлена на основе системной функции в z -плоскости $H(\{z_l\})$, определяемой как суперпозиция P частных системных функций. Можно показать, что для канонической формы фильтра:

$$H(\{z_l\}) = \frac{1}{P} \sum_{l=m}^{P+m-1} \sum_{k=0}^m \tilde{g}_k^{(l)} z_l^{-k} \exp \left(i \sum_{s=1}^k \varphi_{s-1}^{(l)} \right),$$

где $z_l = \exp(i\omega T_l)$.

Синтез фильтров на основе этого выражения приводит к комплексным весовым коэффициентам, что суще-

$$\eta_l^{-1} = \sum_{j,k=0}^m \tilde{g}_j \tilde{g}_k \rho_{jk} \exp \left\{ -0,5 \sum_{b,c=r}^{u-1} F_{bc} \right\} + \gamma \sum_{j=0}^m g_j^2. \quad (6)$$

Потери в l -м периоде повторения, обусловленные адаптацией, являются функцией объема обучающей выборки и находятся как отношение $\Delta\eta_l(n)$ усредненного коэффициента подавления помехи $\langle \eta_l \rangle$ к предельной эффективности подавления:

$$\Delta\eta_l(n) = \langle \hat{\eta}_l \rangle / \lim_{n \rightarrow \infty} \langle \hat{\eta}_l \rangle. \quad (7)$$

Потери адаптации за период вобуляции T_B определяются как суперпозиция потерь в каждом периоде повторения, входящем в ядро вобуляции. Тогда с учетом переходного процесса фильтра рассматриваемые потери можно представить в виде:

$$\Delta\eta(n) = \frac{1}{P} \sum_{l=m}^{P+m-1} \Delta\eta_l(n). \quad (8)$$

На основе выражения (6) и в соответствии с формулами (7), (8) проведен анализ зависимости потерь эффективности подавления пассивной помехи от объема обучающей выборки n . На рис. 3 представлены результаты анализа для фильтра 3-го порядка при $\gamma = 10^{-6}$, $\beta_n = \tilde{\beta} = 0,064$, (кривая 1), $\gamma = 10^{-4}$, $\beta_n = \tilde{\beta} = 0,09$, (кривая 2), $\gamma = 10^{-2}$, $\beta_n = \tilde{\beta} = 0,155$, (кривая 3) в случае обработки линейно вобулированного сигнала с глубиной вобуляции 60 % и ядром $P = 8$. Как видно из представленных зависимостей, увеличение шума приводит к снижению потерь, обусловленных неточностью оценивания аргументов φ_s . Отклонение β_n относительно $\tilde{\beta}$ наряду со снижением предельной эффективности (рис. 1) также приводит к снижению потерь на адаптацию.

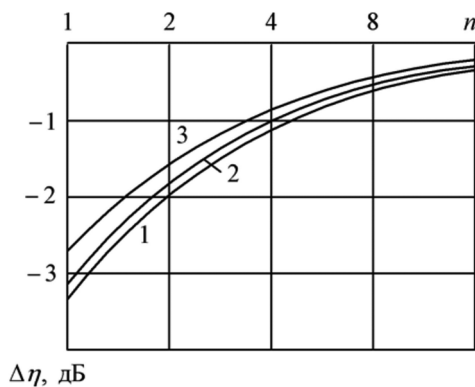


Рис. 3. Зависимости потерь эффективности подавления пассивной помехи от объема обучающей выборки

Заключение

Предложенный метод позволяет оптимизировать весовые коэффициенты нерекурсивного режекторного фильтра с частичной адаптацией к доплеровской фазе пассивной помехи при вобуляции периода повторения в заданном диапазоне изменения спектрально-корреляционных параметров помехи. При этом достигаются выигрыши в предельной эффективности по сравнению с неоптимизированными весовыми коэффициентами.

Анализ эффективности подавления пассивной помехи устанавливает зависимость потерь при частичной адаптации к доплеровской фазе пассивной помехи от объема обучающей выборки.

Проведенный анализ показывает, что в ряде практически важных случаев использование фильтров с частичной адаптацией позволяет существенно снизить затраты на реализацию системы ценой незначительных энергетических потерь.

Литература

1. Skolnik M.I. Introduction to Radar System, 3rd ed., New York: McGraw-Hill, 2001. 862 p.
2. Richards M.A., Scheer J.A., Holm W.A. (Eds.). Principles of Modern Radar: Basic Principles. New York: SciTech Publishing, IET, Edison. 2010. 924 p.
3. Melvin W. L., Scheer J.A. (Eds.). Principles of Modern Radar: Advanced Techniques. New York: SciTech Publishing, IET, Edison, 2013. 846 p.
4. Справочник по радиолокации: в 2 кн. Кн. 1 / под ред. М.И. Скольника; пер. с англ. под ред. В.С. Вербы. М.: Техносфера, 2014. 672 с.
5. Попов Д.И. Адаптация нерекурсивных режекторных фильтров. Известия вузов. Радиоэлектроника. 2009. Т. 52. № 4. С. 46-55.
6. Попов Д.И. Автокомпенсация доплеровской фазы пассивных помех. Цифровая обработка сигналов. 2009. № 2. С. 30-33.
7. Попов Д.И. Автокомпенсация доплеровской фазы многочастотных пассивных помех. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 65. С. 32-37.
8. Попов Д.И. Адаптивное подавление пассивных помех. Цифровая обработка сигналов. 2014. № 4. С. 32-37.
9. Попов Д.И. Адаптивные режекторные фильтры каскадного типа. Цифровая обработка сигналов. 2016. № 2. С. 53-56.
10. Попов Д.И. Адаптивные режекторные фильтры с действительными весовыми коэффициентами. Цифровая обработка сигналов. 2017. № 1. С. 22-26.
11. Попов Д.И. Оптимизация нерекурсивных режекторных фильтров с частичной адаптацией. Цифровая обработка сигналов. 2018. № 1. С. 28-32.
12. Попов Д.И. Оптимизация режекторных фильтров по вероятностному критерию. Цифровая обработка сигналов. 2021. № 1. С. 55-58.
13. Попов Д.И. Обработка неэквидистантных сигналов на фоне пассивных помех. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 80. С. 24-31.
14. Попов Д.И. Режектирование пассивных помех при вобуляции периода повторения. Радиотехника. 2015. № 5. С. 97-101.
15. Попов Д.И. Оптимизация систем обработки многочастотных радиолокационных сигналов. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. № 67. С. 11-18.
16. Репин В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М.: Сов. радио, 1977. 432 с.