

# ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

---

## ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT AND RADIO ENGINEERING

УДК 621.391:621.396.96  
doi:10.21685/2072-3059-2022-2-2

### Оптимизация параметров рекурсивных режекторных фильтров

Д. И. Попов

Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань, Россия

adop@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Объектом исследования является многозвенный рекурсивный режекторный фильтр (РФ), предназначенный для выделения радиолокационных сигналов движущихся целей на фоне пассивных помех в виде мешающих отражений от неподвижных или медленно перемещающихся объектов. Целью работы является оптимизация параметров рекурсивных РФ перестраиваемой структуры в переходном режиме. *Материалы и методы.* Предложен метод параметрической оптимизации многозвенных рекурсивных РФ в переходном режиме, основанный на параметризации амплитудно-частотной характеристики фильтра с последующим использованием введенных параметров как независимых переменных или ограничивающих условий в итерационном алгоритме синтеза по модифицированному с учетом объема обрабатываемой выборки критерию. *Результаты.* На основе параметризации амплитудно-частотной характеристики рекурсивного режекторного фильтра проведен выбор оптимальных весовых коэффициентов в зависимости от требований к эффективности режектирования коррелированной помехи и ее параметров, включая динамический диапазон по отношению к уровню собственного (некоррелированного) шума. *Выводы.* Решение проблемы оптимизации параметров рекурсивных РФ позволяет реально использовать широкие возможности формирования требуемых характеристик РФ и гибкого их управления в зависимости от параметров помехи, что в условиях априорной неопределенности предполагает соответствующую адаптацию РФ.

**Ключевые слова:** многозвенная структура, параметрическая оптимизация, режекторный фильтр, переходный режим, эффективность режектирования

**Для цитирования:** Попов Д. И. Оптимизация параметров рекурсивных режекторных фильтров // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 2. С. 26–35. doi:10.21685/2072-3059-2022-2-2

### Optimizing the parameters of recursive notch filters

D.I. Popov

---

© Попов Д. И., 2022. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russia  
adop@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The object of the study is a multi-link recursive rejection filter (RF) designed to isolate radar signals of moving targets against the background of passive interference in the form of interfering reflections from stationary or slowly moving objects. The aim of the work is to optimize the parameters of the recursive RF of the reconstructed structure in the transient mode. *Materials and methods.* A method of parametric optimization of multi-link recursive RF in a transient mode is proposed, based on parametrization of the frequency response of the filter with subsequent use of the entered parameters as independent variables or limiting conditions in an iterative synthesis algorithm according to a criterion modified taking into account the volume of the processed sample. *Results.* Based on the parametrization of the amplitude-frequency response of a recursive notch filter, the optimal weighting coefficients were selected depending on the requirements for the efficiency of the correlated interference and its parameters, including the dynamic range relative to the level of the actual (uncorrelated) noise. *Conclusions.* Solving the problem of optimizing the parameters of recursive RF allows you to really use the wide possibilities of forming the required RF characteristics and flexibly controlling them depending on the interference parameters, which in conditions of a priori uncertainty implies appropriate adaptation of the RF.

**Keywords:** multi-link structure, parametric optimization, rejection filter, transient mode, cutting efficiency

**For citation:** Popov D.I. Optimizing the parameters of recursive notch filters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2022;(2):26–35. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2022-2-2

## Введение

Рекурсивные режекторные фильтры (РФ) обладают известными преимуществами формирования характеристик перед нерекурсивными РФ того же порядка, что приводит к повышению эффективности выделения сигналов движущихся целей на фоне коррелированных (пассивных) помех [1–6]. Однако наличие рекурсии существенно увеличивает время установления выходного процесса и снижает эффективность выделения сигналов в переходном режиме, имеющем место при дискретном сканировании антенного луча радиолокатора, а также при линейном сканировании в случае поступления кромки помехи. В конечном счете, при времени установления, соизмеримом с длительностью обрабатываемых выборок, переходный режим является основным режимом работы рекурсивных РФ, что привело к решению проблемы ускорения переходного процесса путем перестройки структуры РФ [7]. При этом возникает весьма актуальная задача оптимизации параметров рекурсивных РФ перестраиваемой структуры в переходном режиме.

Рекурсивные РФ открывают широкие возможности формирования требуемых характеристик и их оптимизации на основе выбранного критерия эффективности. Однако задача оптимизации непосредственно весовых коэффициентов РФ по критерию подавления помехи не может быть однозначно решена без ограничений на характеристики фильтра в частотной области. Это приводит к так называемой параметризации амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра с последующим использованием введенных параметров как независимых переменных или ограничивающих условий в проце-

дуре оптимизации. Критерий эффективности РФ является функционалом вектора параметров АЧХ  $y$ , размерность которого, как правило, меньше размерности искомого вектора весовых коэффициентов  $w$ . Параметризация АЧХ предполагает наличие функциональной связи  $w = \psi(y)$ . Эта связь определяется видом аппроксимирующей функции, в качестве которой используются известные из частотного синтеза функции Баттерворта, Бесселя, Чебышева и т.п. Наиболее удобными с точки зрения оптимизации являются функции, приводящие к эллиптическим фильтрам, параметрами которых являются положение нулей АЧХ, частота среза и неравномерность в полосе пропускания.

Методы синтеза эллиптических фильтров по заданным параметрам АЧХ достаточно хорошо разработаны. При этом особенность классических методов синтеза состоит в том, что степени числителя и знаменателя системной функции в  $z$ -плоскости одинаковы. Это не позволяет синтезировать РФ, для которых число полюсов системной функции не равно числу нулей, что соответствует наиболее целесообразному построению РФ в форме каскадного соединения нерекурсивных и рекурсивных звеньев 1-го и 2-го порядков. Синтезу и параметризации АЧХ многозвенных РФ, в общем случае состоящих из произвольного числа последовательно включенных нерекурсивных и рекурсивных звеньев, посвящена работа [8], в которой рассмотрен метод синтеза таких фильтров по квадрату АЧХ и установлена функциональная связь между параметрами АЧХ с одной стороны, и структурой РФ и весовыми коэффициентами отдельных звеньев – с другой стороны.

### Постановка задачи

С учетом гауссовских законов распределений вероятностей сигнала и помехи в качестве критерия эффективности линейного фильтра следует использовать коэффициент улучшения отношения сигнал-помеха. Инвариантность структуры РФ к параметрам сигнала приводит к усредненному по доплеровскому сдвигу фазы сигнала коэффициенту улучшения [9], эквивалентному нормированному относительно прохождения некоррелированного шума коэффициенту подавления помехи

$$\mu = \left( \sigma^2 / \sigma_{\Phi}^2 \right)_{\Pi} / \left( \sigma^2 / \sigma_{\Phi}^2 \right)_{\text{ш}}, \quad (1)$$

где  $\sigma^2$ ,  $\sigma_{\Phi}^2$  – дисперсии помехи или шума соответственно на входе и выходе РФ.

Для решения задачи оптимизации необходимо установить функциональную связь величины  $\mu$  с параметрами РФ. С этой целью следует найти алгоритм обработки РФ перестраиваемой структуры в переходном режиме, учитывающий временные соотношения между моментами перестройки структур отдельных звеньев. Усреднение переходных значений эффективности РФ в пределах обрабатываемой выборки и введение целевой функции  $\mu(w) \rightarrow \max_y$  позволяет решить задачу оптимизации параметров РФ в переходном режиме.

### Алгоритм обработки

Рассмотрим многозвенный рекурсивный РФ, структурная схема которого изображена на рис. 1, в виде каскадного соединения нерекурсивных и рекурсивных звеньев 1-го и 2-го порядка ( $H_{З1,2}$  и  $P_{З1,2}$ ). При этом нерекурсивные звенья имеют фиксированные структуры, а рекурсивные звенья – перестраиваемые. Перестройка структур осуществляется по командам блока управления (БУ). На рис. 2 работы [7] приведена схема каскадного включения нерекурсивного звена 1-го порядка ( $H_{З1}$ ) и рекурсивного звена 2-го порядка ( $P_{З2}$ ), перестройка структуры которого осуществляется путем коммутации рекурсивных связей. В многозвенном рекурсивном РФ в каждом рекурсивном звене после установления процессов в предшествующих звеньях и в нерекурсивной части данного звена по команде БУ замыкается коммутатор. В рекурсивные связи и на выход звена теперь поступают остатки режектирования помехи, соответствующие установившемуся режиму предшествующих звеньев и нерекурсивной части данного звена, что существенно сокращает время переходного процесса. Наиболее просто такая перестройка структуры реализуется при известном начале обрабатываемой последовательности, что имеет место при дискретном сканировании антенного луча радиолокатора.

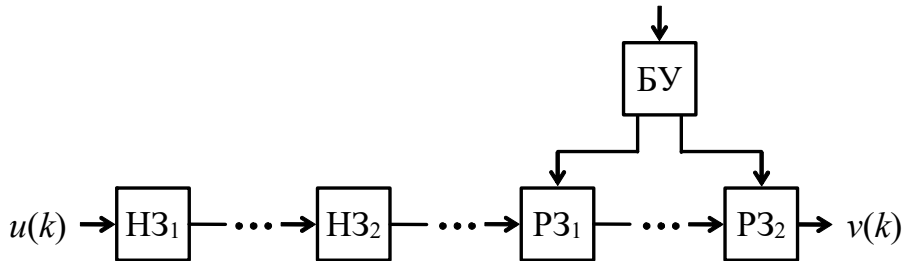


Рис. 1. Структурная схема многозвенного рекурсивного РФ

Системная функция нерекурсивного звена 2-го порядка ( $H_{З2}$ ) и нерекурсивной части  $P_{З2}$  в  $z$ -плоскости имеет вид

$$H_H(z) = \sum_{k=0}^2 a_k z^{-k},$$

а коэффициенты импульсной характеристики задаются весовыми коэффициентами  $a_k$ , причем  $a_0 = a_2 = 1$ ,  $a_1 = a$ . Рекурсивным связям  $P_{З2}$  соответствует системная функция

$$H_P(z) = (1 - b_1 z^{-1} - b_2 z^{-2})^{-1} = \sum_{k=0}^{\infty} g_k z^{-k},$$

где коэффициенты импульсной характеристики [5] равны

$$g_0 = 1, \quad g_1 = b_1 g_0,$$

$$\text{а при } k \geq 2 \quad g_k = b_1 g_{k-1} + b_2 g_{k-2}. \quad (2)$$

Аналогично определяются коэффициенты импульсных характеристик НЗ<sub>1</sub> и РЗ<sub>1</sub> соответственно при  $a_2 = b_1 = b_2 = 0$  и  $a_2 = b_2 = 0$ .

Многозвенный РФ в  $k$ -й момент времени будем описывать весовой функцией  $h_j(k)$ , зависимость которой от  $k$  учитывает перестройку структуры РФ путем коммутации рекурсивных связей по мере достижения на выходах нерекурсивных частей звеньев установившихся состояний, причем  $j = \overline{0, k-1}$ . Коэффициенты  $h_j(k)$  могут быть определены с помощью метода переменных состояния либо непосредственно по импульсным характеристикам отдельных звеньев и их частей. В последнем случае обработку  $k$  значений входной выборки в прямых и рекурсивных связях звеньев удобно описывать раздельно матрицами режекции верхней треугольной формы:

$$\mathbf{G}_p = \left[ G_{jl}^{(p)} \right], \quad j, l = \overline{0, k-1}, \quad p = \overline{1, L-1},$$

где  $L$  – число нерекурсивных и рекурсивных цепей РФ.

Элементы матрицы режекции прямых связей отдельного звена находятся как  $G_{jl}^{(p)} = a_{l-j}^{(p)}$ , где  $a_r^{(p)}$  – весовые коэффициенты прямых связей; а элементы матрицы режекции обратных связей –  $G_{jl}^{(p+1)} = g_{l-j}^{(p+1)}$ , где  $g_r^{(p+1)}$  – коэффициенты импульсной характеристики, определяемые весовыми коэффициентами  $b_i^{(p+1)}$  соответствующей рекурсивной цепи с помощью соотношений (2), причем  $g_r^{(p+1)} = 0$  при  $r < 0$ .

Обработка в выходных связях конечного звена описывается вектор-столбцом  $\mathbf{V} = \{g_l\}^T$ , составленным из коэффициентов их импульсной характеристики. Коммутация рекурсивных связей учитывается при образовании соответствующих матриц режекции  $\mathbf{G}_p$  и вектора  $\mathbf{V}$  введением первых нулевых строк и столбцов, число которых определяется длительностью переходных процессов прямых связей в данном и предшествующих звеньях. Размерность матриц  $\mathbf{G}_p$  и вектора  $\mathbf{V}$  соответствует числу обрабатываемых отсчетов  $k$ . Вектор весовых коэффициентов перестраиваемого РФ теперь определяется в виде

$$\mathbf{H}(k) = \{h_j(k)\} = \left( \prod_{p=1}^{L-1} \mathbf{G}_p \right) \mathbf{V}.$$

Выходная величина многозвенного РФ (рис. 1) в  $k$ -й момент времени находится в виде свертки весовой функции  $h_j(k)$  и входного воздействия  $u(k)$ :

$$v(k) = \sum_{j=0}^{k-1} h_j(k) u(k-j). \quad (3)$$

### Критерий и метод оптимизации

В результате вычисления дисперсий  $\sigma_{\Phi}^2(k) = \overline{v^2(k)}$  на выходе РФ для коррелированной помехи и некоррелированного шума с учетом выражений (1), (3) получим

$$\mu(k) = \frac{\sum_{j=0}^{k-1} h_j^2(k)}{\sum_{j,l=0}^{k-1} h_j(k) h_l(k) \rho_{jl}}, \quad (4)$$

где  $\rho_{jl} = \rho[(j-l)T]$  – коэффициенты межпериодной корреляции помехи;  $T$  – период повторения исходных отсчетов.

Соотношение (4) позволяет определять эффективность РФ перестраиваемой структуры в переходном режиме – в зависимости от момента времени и соответствующего ему числа обрабатываемых отсчетов  $k$ . Расчеты величины  $\mu(k)$  показывают, что перестройка структуры РФ путем коммутации рекурсивных связей позволяет существенно ускорить переходный процесс и достичь установившегося значения эффективности РФ  $m$ -го порядка практически к  $(m+2)$ -му отсчету выборки [7]. С учетом динамики изменения эффективности РФ в переходном режиме и последующего накопления (когерентного или некогерентного) остатков режектирования для оптимизации параметров РФ представляет интерес усредненный в заданных пределах исходной выборки коэффициент

$$\mu = \frac{1}{N - k_1} \sum_{k=k_1+1}^N \mu(k), \quad (5)$$

где  $N$  – объем исходной выборки;  $k_1$  – число первых выходных отсчетов, не принимающих участия в последующей обработке вследствие коммутации, причем  $k_1 \geq m$ .

При параметризации АЧХ РФ коэффициент  $\mu$  является функционалом  $\mu = f(\mathbf{y})$ , а искомый вектор весовых коэффициентов фильтра  $\mathbf{w}$  связан с вектором параметров АЧХ  $\mathbf{y}$  рассмотренной в работе [8] функциональной зависимостью. Целевая функция при оптимизации РФ в рамках принятого критерия и накладываемых ограничений на форму АЧХ  $H(\omega) = H_0(\omega, \mathbf{y})$  записывается в виде  $\mu(\mathbf{w}) \rightarrow \max_{\mathbf{y}}$ . Оптимальный вектор  $\mathbf{y}$  определяется

в результате применения одной из известных итерационных процедур поиска экстремума [10], а соответствующий ему вектор  $\mathbf{w} = \Psi(\mathbf{y})$ .

### Результаты оптимизации

Рассмотрим достаточно типичную структуру РФ в виде каскадного соединения нерекурсивного звена 1-го порядка и рекурсивного звена 2-го порядка (НЗ<sub>1</sub>-РЗ<sub>2</sub>) [7, 8]. Оптимизация сводится к выбору углового положения нулей АЧХ  $\theta_0 = \omega_0 T$ , угловой частоты среза  $\theta_c = \omega_c T$  и неравномерности в полосе пропускания  $\varepsilon$ , связанные соответствующим образом с весовыми

коэффициентами РЗ<sub>2</sub>  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ . В общем случае на каждом шаге итерационной процедуры оптимизации задается вектор  $y = \{\theta_0, \theta_c, \varepsilon\}$ , на основе аппроксимации квадрата АЧХ проводится синтез фильтра НЗ<sub>1</sub>-РЗ<sub>2</sub> в частотной области [8], позволяющий найти нули  $z_{0(1,2)}$  и полюсы  $z_{p(1,2)}$  системной функции РФ, по которым определяются весовые коэффициенты РЗ<sub>2</sub>  $a = -(z_{01} + z_{02})$ ,  $b_1 = z_{p1} + z_{p2}$ ,  $b_2 = -z_{p1}z_{p2}$ , образующие вектор  $w = \{a, b_1, b_2\}$ , и, наконец, вычисляется коэффициент  $\mu$  при заданных параметрах  $N$ ,  $k_1$  и  $\rho_{jl}$ .

Вначале представляют интерес результаты оптимизации фильтра НЗ<sub>1</sub>-РЗ<sub>2</sub> по критерию  $\mu \rightarrow \max_{\theta_0}$ . Задавая  $\theta_c = \text{const}$ ,  $\varepsilon = \text{const}$  и осуществляя по

иск по параметру  $\theta_0$ , можно найти положение нулей в зоне режекции АЧХ, когда обеспечивается ряд экстремумов выражения (5). Анализ выражения (5) показал, что, несмотря на многомодальность входящих в него слагаемых, представляющих собой квадратичные формы, общий функционал  $\mu(\theta_0)$  имеет ярко выраженный унимодальный экстремум, определить который позволяет метод «золотого сечения» [10]. На рис. 2 при  $\theta_c = 0,5\pi$ ,  $\varepsilon = 1$  дБ и  $N = 15$  представлены зависимости оптимальных величин  $a = -2\cos\theta_0$  и  $\theta_0$  от нормированной ширины  $\beta_{\Pi} = \Delta f_{\Pi} T$  гауссовского спектра помехи, соответствующего коэффициентам корреляции  $\rho_{jl} = \exp\{-\pi^2 [\beta_{\Pi}(j-l)]^2 / 2,8\}$ . Как

видим, оптимальные величины  $a$  и  $\theta_0$  определяются в соответствии с параметрами помехи. При этом оказывается, что данная зависимость практически соответствует критерию (3) работы [9] для нерекурсивной части РФ. Это позволяет использовать соответствующие данному критерию алгоритмы для оптимизации весовых коэффициентов прямых связей.

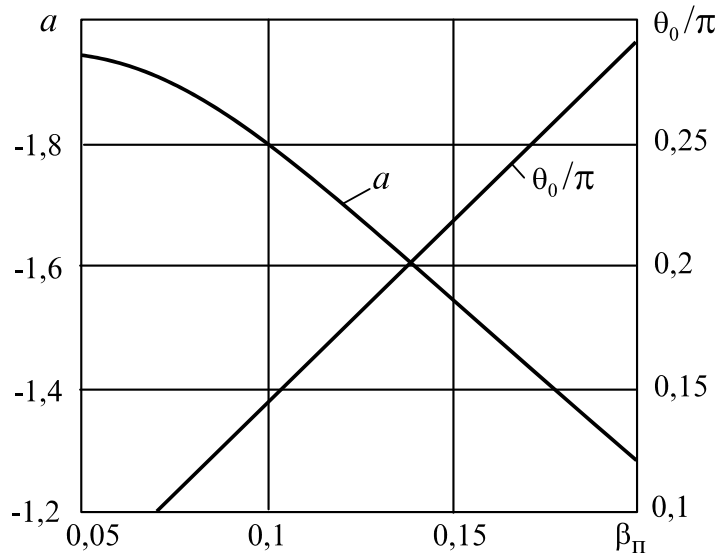


Рис. 2. Оптимальные параметры РФ

Весовые коэффициенты обратных связей определяют выбор частоты среза  $\theta_c$ , связанной с требуемой эффективностью РФ монотонными зависимостями, изображенными на рис. 3 при  $N=15$  и различных значениях нормированной ширины  $\beta_{\Pi}$  спектра помехи и отношения шум-помеха  $\lambda = \sigma_{\text{ш}}^2 / \sigma_{\Pi}^2$ . Наличие некоррелированного шума ограничивает эффективность РФ. Выбор минимально необходимой величины  $\theta_c$ , при которой реализуется предельная или заданная эффективность, соответствует максимальной полосе пропускания РФ и, следовательно, оптимальным коэффициентам обратных связей  $b_1, b_2$ . С учетом некоррелированного (собственного) шума предельная эффективность, как следует из рис. 3, определяется динамическим диапазоном помехи  $\lambda^{-1}$  по отношению к уровню шума. Очевидно, что оптимальная величина  $\theta_c$  в этом случае соответствует области перегиба кривых на рис. 3. При этом коэффициент  $\mu$  приближается к предельной величине с точностью  $\Delta\mu \leq 1$  дБ при максимальной для данных условий ширине полосы пропускания. Как видим, оптимальная величина  $\theta_c$  зависит от параметров помехи, что в условиях априорной неопределенности предполагает соответствующую адаптацию РФ.

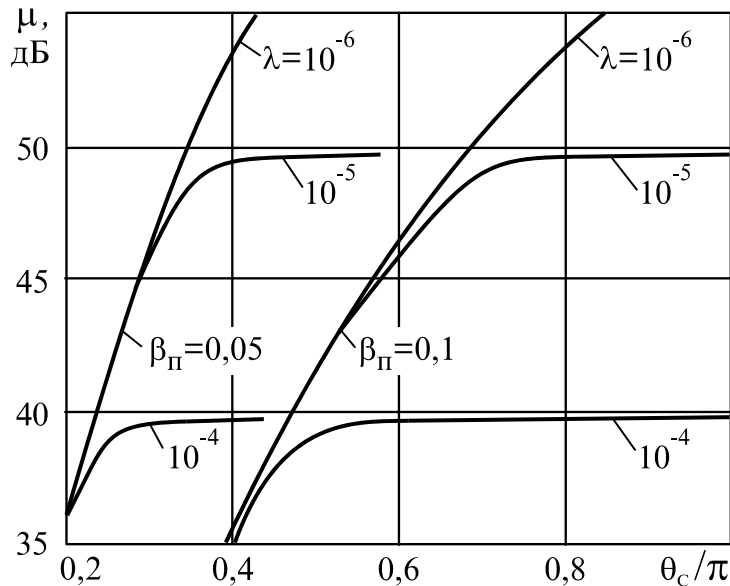


Рис. 3. Зависимости эффективности РФ

Заметим, что для оптимального по критерию (1) или (3) работы [9] нерекурсивного РФ при  $m=3$ ,  $\beta_{\Pi}=0,1$  и  $\lambda=10^{-6}$  коэффициент  $\mu$  составляет около 40 дБ. При той же частоте среза ( $\theta_c=0,71\pi$ ) рекурсивный РФ, как видно из кривых на рис. 3, выигрывает более 10 дБ, а при одинаковой величине  $\mu$  имеет значительно более широкую полосу пропускания, что подтверждает преимущества рекурсивных РФ и возможности гибкого управления их характеристиками.



### Заключение

Предложенный метод параметрической оптимизации многозвенных рекурсивных РФ в переходном режиме основывается на параметризации АЧХ фильтра с последующим использованием введенных параметров как независимых переменных или ограничивающих условий в итерационном алгоритме синтеза по модифицированному с учетом объема обрабатываемой выборки критерию.

Оптимальный выбор коэффициентов прямых связей определяется параметрами помехи в соответствии с функциональными зависимостями для нерекурсивных РФ.

Выбор коэффициентов обратных связей определяется требованиями к эффективности РФ и параметрами помехи, включая ее динамический диапазон по отношению к уровню собственного (некоррелированного) шума.

### Список литературы

1. Radar Handbook / ed. by M. I. Skolnik. 3rd ed. McGraw–Hill, 2008. 1352 p.
2. Melvin W. L., Scheer J. A. Principles of Modern Radar: Advanced Techniques. New York : SciTech Publishing, IET, Edison, 2013. 846 p.
3. Richards M. A. Fundamentals of Radar Signal Processing, Second Edition. New York : McGraw–Hill Education, 2014. 618 p.
4. Кузьмин С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. Киев : Изд-во «КВиЦ», 2000. 428 с.
5. Попов Д. И. Анализ цифровых систем обработки сигналов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2016. № 2. С. 83–92.
6. Попов Д. И. Анализ эффективности подавления пассивных помех режекторными фильтрами // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2018. № 2. С. 87–95.
7. Попов Д. И. Синтез рекурсивных режекторных фильтров в переходном режиме // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 3. С. 75–82.
8. Попов Д. И., Гуськов С. В. Синтез цифровых фильтров при каскадном соединении нерекурсивных и рекурсивных звеньев // Радиотехника. 1981. Т. 36, № 6. С. 31–34.
9. Попов Д. И. Адаптация нерекурсивных режекторных фильтров // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2009, Т. 52, № 4. С. 46–55.
10. Уайлд Д. Дж. Методы поиска экстремума : пер. с англ. М. : Наука, 1967. 268 с.

### References

1. Skolnik M. I. (ed.). *Radar Handbook*. 3rd ed. McGraw–Hill, 2008:1352.
2. Melvin W.L., Scheer J.A. *Principles of Modern Radar: Advanced Techniques*. New York: SciTech Publishing, IET, Edison, 2013:846.
3. Richards M.A. *Fundamentals of Radar Signal Processing, Second Edition*. New York: McGraw–Hill Education, 2014:618.
4. Kuz'min S.Z. *Tsifrovaya radiolokatsiya. Vvedenie v teoriyu = Digital radar. Introduction to theory*. Kiev: Izd-vo «KViTs», 2000:428.
5. Popov D.I. Analysis of digital signal processing systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2016;(2):83–92. (In Russ.)
6. Popov D.I. Analysis of the efficiency of passive interference suppression by notch filters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2018;(2):87–95. (In Russ.)

7. Popov D.I. Synthesis of recursive notch filters in transient mode. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2021;(3):75–82. (In Russ.)
8. Popov D.I., Gus'kov S.V. Synthesis of digital filters with cascade connection of non-recursive and recursive links. *Radiotekhnika = Radio engineering.* 1981;36(6):31–34. (In Russ.)
9. Popov D.I. Adapting Non-Recursive Notch Filters. *Izvestiya vuzov. Radioelektronika = University proceedings. Radioelectronics.* 2009;52(4):46–55. (In Russ.)
10. Uayld D.Dzh. *Metody poiska ekstremuma: per. s angl. = Extremum search methods: translator from English.* Moscow: Nauka, 1967:268. (In Russ.)

**Информация об авторах / Information about the authors**

***Дмитрий Иванович Попов***

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры радиотехнических  
систем, Рязанский государственный  
радиотехнический университет  
имени В. Ф. Уткина (Россия, г. Рязань,  
ул. Гагарина, 59/1)

E-mail: adop@mail.ru

***Dmitriy I. Popov***

Doctor of engineering sciences, professor,  
professor of the sub-department of radio  
engineering systems, Ryazan State  
Radio Engineering University named  
after V. F. Utkin (59/1 Gagarina street,  
Ryazan, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 24.02.2022**

**Поступила после рецензирования и доработки / Revised 20.03.2022**

**Принята к публикации / Accepted 04.04.2022**