

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.391:621.396.96
doi:10.21685/2072-3059-2021-3-8

Синтез рекурсивных режекторных фильтров в переходном режиме

Д. И. Попов

Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань, Россия
adop@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является 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 синтез усовершенствованной структурной схемы рекурсивного режекторного фильтра с ускоренным переходным процессом на его выходе. *Материалы и методы.* На основе метода переменных состояния, дающего адекватное описание фильтров во временной области, в переходном режиме синтезирована структура РФ, усовершенствованная с целью ускорения переходного процесса при поступлении кромки пассивных помех. *Результаты.* Усовершенствование структуры РФ в переходном режиме достигается путем ее перестройки, которая осуществляется коммутацией выхода РФ и обратных связей. При этом на выход РФ и в обратные связи поступают установившиеся значения декоррелированных остатков режектирования нерекурсивной части фильтра, что практически устраняет «звон» в обратных связях, вызываемый средним значением и флуктуациями отсчетов помехи и существенно ускоряет переходный процесс на выходе РФ. Предложена структурная схема перестраиваемого в переходном режиме РФ путем коммутации рекурсивных связей. *Выводы.* Решение проблемы ускорения переходного процесса рекурсивных РФ позволяет реально использовать широкие возможности формирования требуемых характеристик РФ и гибкого их управления.

Ключевые слова: метод переменных состояния, пассивная помеха, перестройка структуры, переходный процесс, режекторные фильтры, ускорение

Для цитирования: Попов Д. И. Синтез рекурсивных режекторных фильтров в переходном режиме // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 3. С. 75–82. doi:10.21685/2072-3059-2021-3-8

Synthesis of recursive rejection filters in transient mode

D.I. Popov

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

Abstract. *Background.* The object of the study is a 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 purpose of this research is to synthesize an improved block diagram of a recursive rejection filter with an accelerated transient process at its output. *Materials and methods.* Based on the method of state variables, which gives an adequate description of filters in the time domain, the RF structure is synthesized in the transient mode, which is improved in order to accelerate the transient process when a passive interference edge arrives. *Results.* The improvement of the RF structure in the transition mode is achieved by its restructuring, which is carried out by switching the RF output and reverse connections. At the same time, the established values of the decorrelated rejection residuals of the nonrecursive part of the filter are transmitted to the RF output and to the feedbacks, which practically eliminate the “ringing” in the feedbacks caused by the average value and fluctuations of the interference samples and significantly accelerate the transient process at the RF output. A block diagram of the RF being reconstructed in the transient mode by switching recursive links is proposed. *Conclusions.* Solving the problem of accelerating the transition process of recursive RF allows you to really use the wide possibilities of forming the required characteristics of the RF and their flexible management.

Keywords: state variable method, passive interference, structure rearrangement, transient, notch filters, acceleration

For citation: Popov D.I. Synthesis of recursive rejection filters in transient mode. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2021;(3):75–82. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-3-8

Введение

Пассивные помехи в виде мешающих отражений от неподвижных или медленно перемещающихся объектов – местных предметов, поверхности суши, моря, гидрометеоров (облаков, дождя, града, снега) и металлизированных отражателей, сбрасываемых для маскировки целей, – существенно нарушают нормальную работу радиолокационных систем (РЛС) различного назначения [1–3]. В когерентно-импульсных РЛС с зондирующими импульсами высокой скважности импульсов при выделении сигналов движущихся целей на фоне пассивных помех основной операцией обработки поступающих данных является режектирование спектральных составляющих помехи, а режекторный фильтр (РФ) – основным узлом соответствующей системы обработки [1, 4].

Среди нерекурсивных и рекурсивных режекторных фильтров известными преимуществами в установившемся режиме обладают рекурсивные РФ, открывающие широкие возможности формирования требуемых характеристик и гибкого их управления [4–6]. Однако установившемуся режиму РФ предшествует обусловленный рекурсивными связями длительный переходный процесс. Нескомпенсированные остатки помехи на выходе РФ в переходном режиме создают мощный фон, маскирующий полезный сигнал и приводящий к ложным обнаружениям.

При дискретном сканировании антенного луча в радиолокационных системах с фазированными антенными решетками, а также при линейном сканировании в случае обнаружения сигнала на фоне дискретной помехи и на фоне передней кромки протяженной помехи длительность обрабатываемых выборок радиолокационных сигналов, как правило, соизмерима с временем установления процессов в рекурсивных фильтрах, а переходный режим явля-

ется основным режимом работы рекурсивных РФ [1, 7]. В связи с этим актуальной задачей является усовершенствование структуры РФ с целью ускорения его переходного процесса и повышения эффективности режектирования пассивных помех в переходном режиме.

1. Описание РФ во временной области

Для синтеза усовершенствованной структуры рекурсивного РФ в переходном режиме воспользуемся методом переменных состояния, дающим адекватное описание фильтров во временной области. Как дискретная система цифровой рекурсивный РФ m -го порядка в k -й момент времени описывается вектором состояния $\mathbf{X}(k)=[x_n(k)]$, где $x_n(k)$ – переменная состояния, соответствующая выходной величине n -го блока задержки РФ на k -м шаге, $k = \overline{0, N-1}$, $n = \overline{1, m}$, N – объем выборки.

Связь между состояниями РФ на k -м и $(k+1)$ -м шагах и между состоянием и входным воздействием описывается разностным матричным уравнением состояния РФ, которое в стандартной форме имеет вид [8]:

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{X}(k) + \mathbf{B}u(k), \quad (1)$$

где \mathbf{A} – квадратная матрица, определяющая связь между состояниями на k -м и $(k+1)$ -м шагах; \mathbf{B} – вектор-столбец, описывающий зависимость между состоянием и входным воздействием $u(k)$.

Решением разностного уравнения (1) является вектор состояния на k -м шаге:

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{A}^k \mathbf{X}(0) + \sum_{l=0}^{k-1} \mathbf{A}^{k-1-l} \mathbf{B}u(l), \quad (2)$$

зависящий от параметров фильтра и вектора начального состояния $\mathbf{X}(0)$ и позволяющий из матричного уравнения типа «вход – состояние – выход» определить выходную величину РФ

$$y(k) = \mathbf{C}\mathbf{X}(k) + du(k) = \mathbf{C}\mathbf{A}^k \mathbf{X}(0) + \mathbf{C} \sum_{l=0}^{k-1} \mathbf{A}^{k-1-l} \mathbf{B}u(l) + du(k), \quad (3)$$

где \mathbf{C} – вектор-строка, описывающая связь между состоянием РФ и выходной величиной; d – скаляр, характеризующий связь между входом и выходом.

2. Синтез структуры усовершенствованного РФ

Синтез усовершенствованной структуры РФ с целью ускорения переходного процесса предполагает формирование вектора начального состояния $\mathbf{X}(0)$. Критерий ускорения переходного процесса основывается на предположении постоянства выходной величины РФ и, следовательно, состояния с момента появления помехи

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{X}(k) = \mathbf{X}(0) \text{ или } \mathbf{X}(k+1) - \mathbf{X}(k) = 0 \text{ для } k \geq 0. \quad (4)$$

Для выполнения критерия (4) требуется прямоугольность огибающей выборки помехи, что имеет место при дискретном режиме обзора и в сочета-

нии с известным временем поступления выборки открывает возможности ускорения переходного процесса РФ. Если форма огибающей отличается от прямоугольной, например при линейном (непрерывном) сканировании, следует фиксировать момент появления помехи и применять предварительное взвешивание отсчетов для обеспечения прямоугольности огибающей.

Значение вектора начального состояния $\mathbf{X}(0)$, при котором достигается компенсация постоянной составляющей помехи на выходе РФ в переходном режиме, соответствующая нулевому отклику на немодулированную выборку детерминированных отсчетов [т.е. $y(0) = y(k) = y(k+1) = 0$ при $u(0) = u(k) = u(k+1)$], согласно критерию (4) определяется уравнением

$$\mathbf{A}^k (\mathbf{A} - \mathbf{I}) \mathbf{X}(0) + \mathbf{A}^k \mathbf{B} u(0) = 0. \quad (5)$$

Решением уравнения (5) является вектор начального состояния

$$\mathbf{X}(0) = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} u(0), \quad (6)$$

где \mathbf{I} – единичная матрица.

Вид вектора $\mathbf{X}(0)$ в соответствии с выражением (6) предполагает введение взвешенных значений первого отсчета помехи $u(0)$ в момент его появления на выходы блоков задержки РФ, что приводит к неизменности состояния и выходной величины РФ при поступлении выборки отсчетов помехи постоянной амплитуды. В случае реальных выборок использование только первого отсчета $u(0)$ не сразу приводит к установившемуся режиму работы, а лишь несколько ускоряет переходный процесс.

Учитывая флюктуирующий характер выборки, более эффективного ускорения переходного процесса можно достичь, если использовать начальное состояние, пропорциональное не только величине одного первого отсчета, а комбинации первых отсчетов $u(k)$, $k = \overline{0, m-1}$. Для этого аналогично (2) воспользуемся выражением вектора состояния к моменту поступления m -го отсчета

$$\mathbf{X}(m) = \mathbf{A}^m \mathbf{X}(0) + \sum_{l=0}^{m-1} \mathbf{A}^{m-1-l} \mathbf{B} u(l). \quad (7)$$

Критерию (4), полагающему $\mathbf{X}(m) = \mathbf{X}(0)$, будет соответствовать обработка m отсчетов только прямыми связями РФ без учета его обратных связей. При таком условии справедливо вытекающее из выражения (7) соотношение

$$\mathbf{X}(m) = \sum_{l=0}^{m-1} \mathbf{A}^{m-1-l} \mathbf{B} u(l) = \mathbf{X}(0). \quad (8)$$

Использование в соотношении (3) вектора $\mathbf{X}(m)$ в качестве вектора начального состояния приводит к модифицированному выражению для выходной величины

$$y(k) = \mathbf{C}\mathbf{A}^k\mathbf{X}(m) + \mathbf{C}\sum_{l=m}^{k-1}\mathbf{A}^{k-1-l}\mathbf{B}u(l) + du(k), \quad k \geq m. \quad (9)$$

Таким образом, формирование начального состояния согласно (8) требует использования только прямых связей РФ во время поступления m отсчетов выборки и достигается перестройкой структуры РФ, которая осуществляется коммутацией выхода РФ и обратных связей.

Проиллюстрируем синтез усовершенствованной структуры РФ в переходном режиме на примере представляющего наибольший интерес для практики каскадного соединения нерекурсивного звена 1-го порядка и рекурсивного звена 2-го порядка (НЗ₁–РЗ₂) с весовыми коэффициентами рекурсивного звена в прямых связях $a_0 = a_2 = 1$, $a_1 = a$; a в обратных связях – b_1 и b_2 . Согласно выражению (8) вектор начального состояния имеет вид

$$\mathbf{X}(3) = \begin{bmatrix} au(2) + (1-a)u(1) - u(0) \\ u(2) - u(1) \\ u(2) \end{bmatrix}.$$

Формирование вектора $\mathbf{X}(3)$ происходит в результате обработки первых входных отсчетов в нерекурсивной части РФ. Выход фильтра коммутируется только на четвертом шаге выборки. Одновременно коммутируются обратные связи, что соответствует перестройке структуры РФ.

После подстановки вектора $\mathbf{X}(3)$ в выражение (9) при $k = 3$ для выходной величины получим

$$y(3) = u(3) - (1-a)u(2) + (1-a)u(1) - u(0).$$

Как видим, на выход РФ и в обратные связи поступают установившиеся значения декоррелированных остатков режектирования нерекурсивной части фильтра, что практически устраняет «звон» в обратных связях, вызываемый средним значением и флуктуациями отсчетов помехи, и существенно ускоряет переходный процесс на выходе РФ.

3. Структурная схема усовершенствованного РФ

В качестве исходной используем фиксированную структуру рекурсивного РФ, приведенную на рис. 1. Схема представляет собой каскадное включение нерекурсивного звена 1-го порядка и рекурсивного звена 2-го порядка и содержит запоминающие на период повторения T обрабатываемых отсчетов устройства ЗУ_T, сумматоры (Σ) и весовые блоки с коэффициентами a , b_1 и b_2 . На выход РФ и в рекурсивные связи поступают некомпенсированные остатки режектирования помехи $y(k)$, соответствующие переходному режиму нерекурсивной части РФ, что значительно увеличивает время переходного процесса выходных отсчетов пассивной помехи, маскирующих сигнал от цели.

Ускорение переходного процесса, как показано выше, достигается перестройкой структуры РФ. Приведенная на рис. 2 структурная схема перестраиваемого РФ также содержит запоминающие на период повторения T

обрабатываемых отсчетов устройства $ЗУ_T$, сумматоры (Σ), весовые блоки с коэффициентами a , b_1 , b_2 и дополнительно – блок управления (БУ) и коммутатор (Км). Перестройка структуры РФ реализуется путем коммутации рекурсивных связей (b_1 и b_2). К приходу 4-го отсчета (импульса), соответствующего установлению процессов в нерекурсивной части РФ, по команде блока управления (БУ) находившийся в разомкнутом состоянии коммутатор (Км) замыкается. В рекурсивные связи и на выход РФ теперь поступают остатки режектирования помехи, соответствующие установившемуся режиму нерекурсивной части РФ, что существенно сокращает время переходного процесса при компенсации отсчетов пассивной помехи.

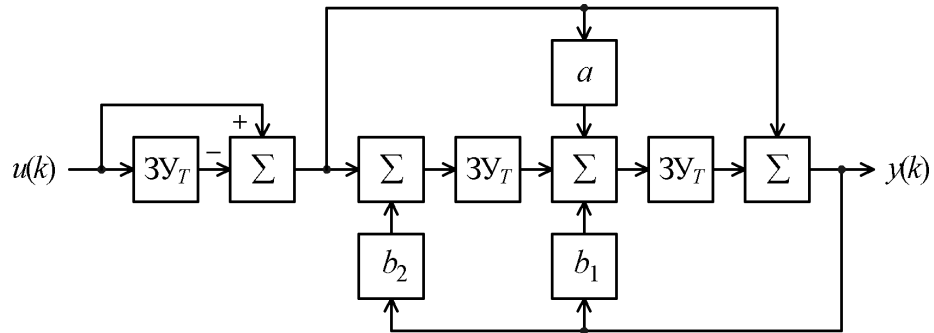


Рис. 1. Схема рекурсивного РФ фиксированной структуры

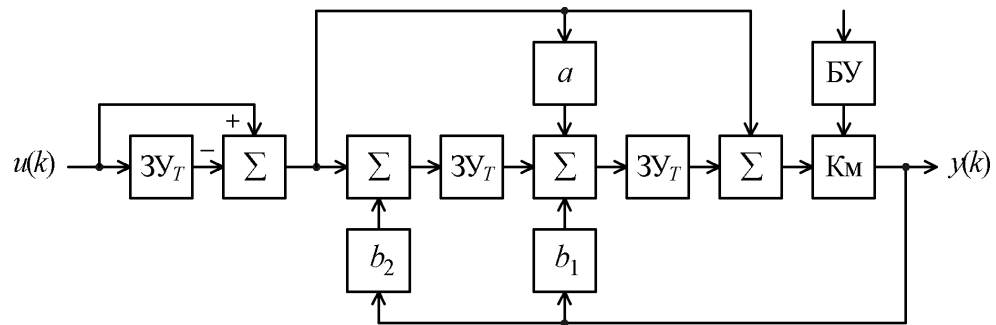


Рис. 2. Схема рекурсивного РФ перестраиваемой структуры

Дальнейшая обработка отсчетов смеси сигналов и помех происходит обычным образом: отсчеты последовательно поступают на запоминающие устройства $ЗУ_T$, весовые блоки (a , b_1 и b_2) и сумматоры (Σ). На выходе РФ образуются отсчеты смеси сигналов и декоррелированных за поступившее число периодов остатков помехи. Эхо-сигналы движущихся целей, отличающиеся от узкополосной помехи доплеровской модуляцией, не компенсируются и поступают на выход РФ.

Заметим, что наиболее просто перестройка структуры РФ осуществляется при известном начале обрабатываемой последовательности, имеющем место при дискретном сканировании антенного луча.

При линейном (непрерывном) режиме обзора усовершенствование структуры РФ с целью ускорения его переходного процесса имеет свои осо-

бенности, обусловленные модуляцией импульсов помехи на ее кромках диаграммой направленности антенны. Вначале осуществляется обнаружение передней кромки помехи по всем модулированным импульсам кромки к моменту прихода импульса, соответствующего плоскому участку огибающей помехи. Далее задержанные отсчеты кромки помехи взвешиваются с целью восстановления прямоугольности их огибающей, что позволяет при аналогичной рис. 2 обработке производить эффективное выделение доплеровских сигналов, не дожидаясь поступления импульсов плоского участка огибающей. При появлении и обнаружении задней кромки помехи также путем взвешивания отсчетов происходит восстановление прямоугольности ее огибающей.

Практическая реализация рассмотренного РФ осуществляется современными аппаратно-программными средствами цифровой обработки сигналов.

Заключение

Синтезированный методом переменных состояния усовершенствованный рекурсивный РФ позволяет осуществить ускорение переходного процесса путем перестройки его структуры. При этом на выход РФ и в обратные связи поступают установившиеся значения декоррелированных остатков режектирования нерекурсивной части фильтра, что практически устраняет «звон» в обратных связях, вызываемый средним значением и флуктуациями отсчетов помехи.

Предложена структурная схема усовершенствованного РФ, в котором перестройка структуры РФ реализуется путем коммутации рекурсивных связей после установления процессов в нерекурсивной части РФ. Поступление в рекурсивные связи и на выход РФ остатков режектирования помехи, соответствующих установившемуся режиму нерекурсивной части РФ, существенно сокращает время переходного процесса при компенсации отсчетов пассивной помехи.

В дальнейшем представляет интерес проведение сравнительного анализа эффективности РФ фиксированной и перестраиваемой структуры в установившемся и переходном режимах.

Решение проблемы ускорения переходного процесса рекурсивных РФ позволяет реально использовать широкие возможности формирования требуемых характеристик данных РФ и гибкого их управления, что в условиях априорной неопределенности спектрально-корреляционных характеристик пассивных помех создает благоприятные условия для соответствующей адаптации РФ.

Список литературы

1. Skolnik M. I. Radar Handbook. 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 : КВЦ, 2000. 428 с.
5. Попов Д. И. Адаптация нерекурсивных режекторных фильтров // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2009. Т. 52, № 4. С. 46–55.

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. Оптимизация цифровых систем обработки сигналов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 1. С. 96–105.
8. Директор С., Рорер Р. Введение в теорию систем : пер. с англ. / под ред. Н. П. Бусленко. М. : Мир, 1974. 464 с.

References

1. Skolnik M.I. *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: KViTs, 2000:428.
5. Popov D.I. Adaptation of non-recursive rejection filters. *Izvestiya vuzov. Radioelektronika = University proceedings. Radioelectronics*. 2009;52(4):46–55. (In Russ.)
6. Popov D.I. Analysis of the efficiency of passive interference's suppression with rejection 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. Optimization of digital signal processing systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2017;(1):96–105. (In Russ.)
8. Direktor S., Rorer R. *Vvedenie v teoriyu sistem: per. s angl. = Introduction to systems theory: translated from English*. Moscow: Mir, 1974:464. (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 03.06.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 23.08.2021

Принята к публикации / Accepted 19.09.2021