

УДК 621.391:621.396.96

Режектирование пассивных помех рекурсивными фильтрами в переходном режиме

Passive interference rejection by recursive filters in transient mode

Попов / Popov D.

Дмитрий Иванович

(adop@mail.ru)

доктор технических наук, профессор.

ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»,

профессор кафедры радиотехнических систем.

г. Рязань

Ключевые слова: анализ эффективности режектирования – analysis of the effectiveness of rejecting; метод переменных состояния – the method of state variables; пассивная помеха – passive interference; перестройка структуры – structural restructuring; переходный режим – transient mode; режекторные фильтры – rejector filters; ускорение – acceleration.

Методом переменных состояния в переходном режиме синтезирована структура рекурсивного режекторного фильтра (РФ), усовершенствованная с целью ускорения переходного процесса при поступлении кромки пассивных помех. Предложена перестройка структурной схемы РФ в переходном режиме путем коммутации рекурсивных связей. Проведен сравнительный анализ эффективности режектирования пассивных помех РФ фиксированной и перестраиваемой структуры в переходном режиме. Показано, что перестройка структуры РФ существенно сокращает длительность процессов установления в фильтре и повышает эффективность режектирования пассивных помех в переходном режиме работы.

Using the method of state variables in the transient mode, the structure of a recursive rejector filter (RF) has been synthesized, improved in order to accelerate the transient process when the passive interference edge arrives. The restructuring of the RF structural scheme in a transitional mode by switching recursive links is proposed. A comparative analysis of the effectiveness of RF passive interference rejection of fixed and tunable structures in the transient mode is carried out. It is shown, that the restructuring of the RF structure significantly reduces the duration of the establishment processes in the filter and increases the efficiency of passive interference rejection in the transient mode of operation.

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 (РФ) известными преимуществами в установленном режиме обладают рекурсивные РФ, открывающие широкие возможности формирования требуемых характеристик и гибкого их управления [5–8]. Однако установленном 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 радио-

локационных сигналов, как правило, соизмерима с временем установления процессов в рекурсивных фильтрах, а переходный режим является основным режимом работы рекурсивных РФ [1, 5]. 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.

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, $k = 0, N-1$, $n = 1, m$, 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 [9]:

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

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:

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

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

Синтез структуры усовершенствованного РФ

Синтез усовершенствованной структуры РФ с целью ускорения переходного процесса предпола-

гает 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:

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

Для выполнения критерия (4) требуется прямоугольность огибающей выборки помехи, что имеет место при дискретном режиме обзора и в сочетании 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 $u(k)$, $k = 0, m-1$. 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 $X(m) = X(0)$, будет соответствовать обработка m отсчетов только прямыми связями РФ без учета его обратных связей. При таком условии справедливо вытекающее из выражения (7) соотношение

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

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

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

$$k \geq m.$$

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 $a_0 = a_2 = 1, a_1 = a$; а в обратных связях $-b_1$ и b_2 . Согласно выражению (8), вектор начального состояния имеет вид

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

Формирование вектора $X(3)$ 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 $X(3)$ 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.

Структурная схема усовершенствованного РФ

Ускорение переходного процесса, как показано выше, достигается перестройкой структуры РФ. Приведенная на рис. 1 структурная схема перестраиваемого режекторного фильтра содержит запоминающие на период повторения T обрабатываемых отсчетов устройства $ЗУ_T$, сумматоры (Σ), весовые блоки a, b_1 и b_2 , 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.

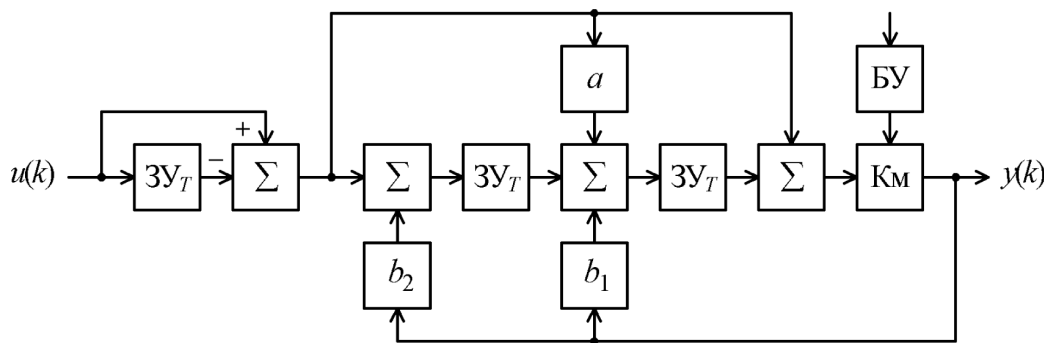


Рис. 1. Структурная схема перестраиваемого режекторного фильтра

Дальнейшая обработка отсчетов смеси сигналов и помех происходит обычным образом: отсчеты последовательно поступают на запоминающие устройства ZU_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 непрерывном режиме обзора усовершенствование структуры РФ с целью ускорения его переходного процесса имеет свои особенности, 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 прямоуглольности их огибающей, что позволяет при аналогичной рис. 1 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 прямоуглольности ее огибающей.

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

Анализ эффективности РФ в переходном режиме

Системная функция в z -плоскости рекурсивного РФ в виде каскадного соединения нерекурсивного звена 1-го порядка и рекурсивного звена 2-го порядка имеет вид

$$H(z) = \frac{(z-1)(z^2+az+1)}{z(z^2-b_1z-b_2)} = \frac{z^3-(1-a)z^2+(1-a)z-1}{z(z^2-b_1z-b_2)} = \sum_{k=0}^{\infty} g_k z^{-k},$$

где $z = e^{i\omega T}$; g_k – коэффициенты импульсной характеристики, соответствующие РФ фиксированной структуры и определяемые из соотношений:

$$g_0 = d_0, g_1 = d_1 + b_1 g_0, g_k = d_k + \sum_{j=1}^2 b_j g_{k-j}, \quad (10)$$

$$\text{а при } k > 3 \quad g_k = \sum_{j=1}^2 b_j g_{k-j}, \quad (11)$$

причем

$$d_0 = -d_3 = 1, d_1 = -d_2 = -(1-a).$$

Нерекурсивной части РФ соответствует системная функция

$$H_n(z) = 1 - (1-a)z^{-1} + (1-a)z^{-2} - z^{-3} = \sum_{k=0}^3 g_k^{(1)} z^{-k}$$

и коэффициенты импульсной характеристики

$$g_0^{(1)} = -g_3^{(1)} = d_0 = -d_3 = 1, \\ g_1^{(1)} = -g_2^{(1)} = d_1 = -d_2 = -(1-a), \quad (12)$$

а рекурсивной части – системная функция

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

и коэффициенты импульсной характеристики

$$g_0^{(2)} = 1, g_1^{(2)} = b_1,$$

а при

$$k \geq 2 \quad g_k^{(2)} = b_1 g_{k-1}^{(2)} + b_2 g_{k-2}^{(2)}. \quad (13)$$

Рассмотрим эффективность режективного пассивной помехи в переходном режиме рекурсивными РФ фиксированной и перестраиваемой структуры. Полагаем, что цифровые отсчеты $U_j = x_j + iy_j$ комплексной огибающей гауссовской узкополосной помехи при скомпенсированной доплеровской скорости описываются корреляционными моментами

$$R_{jk} = \overline{U_j U_k^*} / 2 = \sigma_n^2 \rho_{jk} + \sigma_{ш}^2 \delta_{jk},$$

где σ_n^2 , $\sigma_{ш}^2$ – дисперсии помехи и собственного шума приемного устройства соответственно, ρ_{jk} – коэффициенты межпериодной корреляции помехи, δ_{jk} – символ Кронекера.

На выходе реализуемого в двух квадратурных каналах РФ фиксированной структуры в переходном режиме имеем

$$V = \sum_{j=0}^{k-1} g_j U_{k-j}.$$

Дисперсия помехи на выходе РФ определяется следующим образом:

$$\sigma_{V_{\text{н}}}^2 = \frac{1}{2} \overline{VV^*} = \sigma_{\text{н}}^2 \sum_{j,k=0}^{k-1} g_j g_k \rho_{jk} + \sigma_{\text{ш}}^2 \sum_{j=0}^{k-1} g_j^2.$$

Эффективность РФ будем оценивать по нормированному относительно прохождения некоррелированного собственного шума коэффициенту подавления помехи [5]:

$$\mu = (\sigma_{V_{\text{ш}}}^2 / \sigma_{\text{ш}}^2) / (\sigma_{V_{\text{н}}}^2 / \sigma_{\text{н}}^2). \tag{14}$$

Для РФ фиксированной структуры с учетом выражения (14) получим:

$$\mu(k) = \frac{\sum_{j=0}^{k-1} g_j^2}{\left(\sum_{j,k=0}^{k-1} g_j g_k \rho_{jk} + \lambda \sum_{j=0}^{k-1} g_j^2 \right)}, \tag{15}$$

где $\lambda = \sigma_{\text{ш}}^2 / \sigma_{\text{н}}^2$ – отношение шум/помеха.

Представляя выходную величину РФ перестраиваемой структуры с учетом коммутации рекурсивных связей в виде

$$V = \sum_{j=0}^{k-4} g_j^{(2)} \sum_{l=0}^3 g_l^{(1)} U_{4+j-l},$$

в результате вычислений, аналогичных предыдущим, получим:

$$\mu(k) = \frac{\sum_{l,p=0}^3 \sum_{j=|l-p|}^{k-4} g_j^{(2)} g_{j-|l-p|}^{(2)} g_l^{(1)} g_p^{(1)}}{\left(\sum_{j,k=0}^{k-4} \sum_{l,p=0}^3 g_j^{(2)} g_{k|}^{(2)} g_l^{(1)} g_p^{(1)} \rho_{j-l, k-p} + \lambda \sum_{l,p=0}^3 \sum_{j=l-p}^{k-4} g_j^{(2)} g_{j-|l-p|}^{(2)} g_l^{(1)} g_p^{(1)} \right)}. \tag{16}$$

Результаты расчетов эффективности режектирования в переходном режиме при гауссовской аппроксимации коэффициентов корреляции помехи $\rho_{jk} = \exp\{-[\pi(j-k)\beta_{\text{н}}]^2 / 2,8\}$, нормированной ширине спектра помехи $\beta_{\text{н}} = \Delta f_{\text{н}} T = 0,05$ и $\lambda = 10^{-6}$ представлены на рис. 2. Кривая 1 соответствует РФ фиксированной структуры, кривая 2 – РФ перестраиваемой структуры. При этом кривая 1 для РФ фиксированной структуры рассчитана в соответствии с выражением (15), в котором коэффициенты импульсной характеристики g_k определяются соотношениями (10) и (11). Кривая 2 для РФ перестраиваемой структуры рассчитана в соответствии с выражением (16), в котором коэффициенты импульсной характеристики $g_k^{(1)}$ не рекурсивной части РФ определяются соотношениями (12), а коэффициенты импульсной характеристики $g_k^{(2)}$ рекурсивной части РФ – соотношениями (13).

В обоих случаях весовые коэффициенты $a = -1,9375$, $b_1 = -0,6875$ и $b_2 = -0,5625$. Как видим, установление процессов в РФ перестраиваемой структуры происходит практически к 5-му отсчету выборки, приводя к существенным (до десятков децибел) выигрышам в эффективности режектирования пассивной помехи в переходном режиме по сравнению с РФ фиксированной структуры.

С учетом решения проблемы ускорения переходного процесса рекурсивные РФ позволяют реально использовать широкие возможности формирования требуемых характеристик и гибкого их управления, что в условиях априорной неопределенности спектрально-корреляционных характеристик пассивных помех создает благоприятные условия для соответствующей адаптации РФ [10].

Заключение

Синтезированный методом переменных состояния усовершенствованный рекурсивный РФ позволяет осуществить ускорение переходного процесса путем перестройки его структуры. При этом на выход РФ и

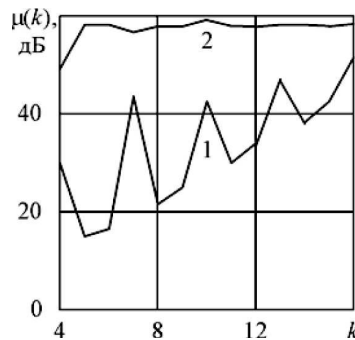


Рис. 2. Эффективность режектирования помехи

в обратные связи поступают установившиеся значения декоррелированных остатков режектирования нерекурсивной части фильтра, что практически устраняет «звон» в обратных связях, вызываемый средним значением и флюктуациями 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.

Проведенный сравнительный анализ РФ фиксированной и перестраиваемой структуры показал, что перестройка структуры РФ путем коммутации рекурсивных связей существенно сокращает длительность процессов установления в фильтре, приводя к существенным (до десятков децибел) выигрышам в эффективности режектирования пассивной помехи в переходном режиме по сравнению с РФ фиксированной структуры, и повышает эффективность режектирования пассивных помех в переходном режиме работы.

Литература

1. Skolnik, M.I. Radar Handbook / M.I. Skolnik. – 3rd ed. – New York : McGraw-Hill, 2008. – 1352 p.
2. Richards, M.A. Principles of Modern Radar: Basic Principles / M.A. Richards, J.A. Scheer, W.A. Holm. – New York : SciTech Publishing, 2010. – 924 p.
3. Melvin, W.L. Principles of Modern Radar. Advanced Techniques / W.L. Melvin, J.A. Scheer. – New York : SciTech Publishing, 2013. – 846 p.
4. Richards, M.A. Fundamentals of Radar Signal Processing, Second Edition / M.A. Richards. – New York : McGraw-Hill Education, 2014. – 618 p.
5. Кузьмин, С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С.З. Кузьмин. – Киев : КВиЦ, 2000. – 428 с.
6. Цифровая обработка сигналов в многофункциональных радиолокаторах. Методы. Алгоритмы. Аппаратура: монография / под ред. Г.В. Зайцева. – Москва : Радиотехника, 2015. – 376 с.
7. Клочко, В.К. Оценивание параметров радиосигналов от подвижных маловысотных объектов / В.К. Клочко, В.П. Кузнецов, В.Б. Хунг // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2022. – № 80. – С. 12–23
8. Драч, В.Е. Математическая модель для анализа эффективности селекции и обнаружения движущихся целей / В.Е. Драч, Н.В. Самбуров, И.В. Чухраев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2023. – № 86. – С. 22–31.
9. Директор, С. Введение в теорию систем / С. Директор, Р. Рорер: пер. с англ. под ред. Н.П. Бусленко. – Москва : Мир, 1974. – 464 с.

10. Паршин, Ю.Н. Адаптивные алгоритмы обработки сигналов с разделением на пространственный и временной компоненты на фоне комплекса широкополосной и узкополосной помех / Ю.Н. Паршин, К.В. Буй // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2025. – № 91. – С. 3–12.