

Синтез режекторных фильтров при вобуляции периода повторения**Synthesis of rejection filters during the wobble of the repetition period****Попов / Popov D.**

Дмитрий Иванович

(adopr@mail.ru)

доктор технических наук, профессор.

ФГБОУ ВО «Рязанский государственный

радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина»,

профессор кафедры радиотехнических систем.

г. Рязань

Ключевые слова: адаптация – adaptation; алгоритмы режектирования – rejection algorithms; весовые коэффициенты – weights; вобуляция периода повторения – wobble of repetition period; пассивные помехи – passive interference; синтез – synthesis; эффективность режектирования – rejection efficiency.

Рассмотрена задача синтеза нерекурсивных режекторных фильтров с действительными весовыми коэффициентами, осуществляющих адаптивное режектирование пассивной помехи при вобуляции периода повторения. Синтез оптимального весового вектора режекторного фильтра выполнен на основе экстремальных свойств собственных значений корреляционной матрицы помехи. Получены выражения для действительных весовых коэффициентов режекторного фильтра. Синтезированные алгоритмы с действительными весовыми коэффициентами позволяют существенно упростить структуру адаптивного режекторного фильтра, ограничивая область его целесообразного использования диапазоном малых доплеровских фаз пассивной помехи. Проведенный анализ показывает, что предложенный алгоритм в зависимости от закона и параметров вобуляции периода повторения позволяет получить дополнительные выигрыши по сравнению с известными стационарными алгоритмами.

The problem of synthesis FIR rejection filters with the actual weights, performing adaptive rejection clutter wobble repetition period is considered. Synthesis of optimal weight vector rejection filter is based on the extreme properties of eigenvalues of the correlation matrix clutter. The expressions for the actual weight coefficients of the rejection filter are obtained. Synthesized algorithms with real weights can significantly simplify the structure of the adaptive rejection filter, limiting the scope of its practical use of a range of small Doppler phase clutter. The analysis shows, that the proposed algorithm, depending on the parameters of the law and the wobble repetition period provides additional gains in comparison to known fixed algorithms.

Введение

Основной операцией при обнаружении сигналов движущихся целей на фоне пассивных помех, создаваемых мешающими отражениями от неподвижных или медленно перемещающихся объектов, является режектирование спектральных составляющих помехи [1–4]. Априорная неопределенность спектрально-корреляционных характеристик помехи, а также их неоднородность и нестационарность в зоне обзора существенно затрудняют реализацию предельных возможностей режектирования помехи.

Преодоление априорной неопределенности параметров помехи в соответствии с методологией адаптивного байесовского подхода основывается на методах адаптации к неизвестным корреляционным свойствам помехи – аргументу и модулю коэффициентов межпериодной корреляции – путем замены этих параметров их состоятельными оценками [5], что приводит к алгоритмам адаптивного режектирования с комплексными весовыми коэффициентами и соответствующим адаптивным режекторным фильтрам (АРФ) [6–8]. Реализация данных АРФ в цифровом виде требует высокого быстродействия выполнения арифметических операций. Избежать указанных трудностей можно путем предварительной компенсации доплеровского сдвига фазы помехи [9]. Другим вариантом упрощения АРФ является использование действительных весовых коэффициентов.

Кроме априорной неопределенности существенно затрудняют реализацию эффективного обнаружения сигналов движущихся целей так называемые слепые скорости цели. Одним из способов исключения слепых скоростей является изменение (вобуляция) периода повторения импульсов [6, 10]. В работе [11] по энергетическому критерию эффективности синтезированы алгоритмы адаптивного режектирования пассивных помех с априорно неиз-

вестными корреляционными характеристиками при вобуляции периода повторения. При этом реализация данных алгоритмов предполагает использование комплексных весовых коэффициентов, сложность которых обуславливает необходимость их упрощения путем перехода к действительным весовым коэффициентам. Целью настоящей работы является синтез АРФ с действительными весовыми коэффициентами при вобуляции периода повторения и определение области целесообразного их использования.

Критерий и алгоритмы адаптации

Применительно к рассматриваемой задаче синтез некурсивного режекторного фильтра порядка m заключается в определении вектора действительных весовых коэффициентов $\mathbf{g} = \{g_k\}$, где $k = 0, m$, реализующего предельную эффективность выделения сигнала от цели на фоне пассивной помехи. Оптимизацию проведем по критерию максимизации усредненного по доплеровской фазе сигнала коэффициента улучшения отношения сигнал/помеха:

$$\mu_{\max} = \max_{\mathbf{g}} (\mathbf{g}^T \mathbf{g} / \mathbf{g}^T \mathbf{R} \mathbf{g}), \quad (1)$$

где $\mathbf{R}$ – корреляционная матрица помехи, элементы которой задаются выражением $R_{jk} = \rho_{jk} \exp(i \varphi_{jk})$, где ρ_{jk} – коэффициенты межпериодной корреляции, φ_{jk} – доплеровская фаза помехи, $j, k = 0, m$.

Ограничивающее условие получения действительных весовых коэффициентов приводит к достаточности учета только действительной части r_{jk} элементов R_{jk} матрицы $\mathbf{R}$. Таким образом, для дальнейшего рассмотрения следует использовать корреляционную матрицу помехи $\mathbf{r}$ с элементами $r_{jk} = \text{Re } R_{jk} = \rho_{jk} \cos \varphi_{jk}$.

При вобуляции периода повторения корреляционная матрица помехи $\mathbf{r}$ распадается на l подматриц $\mathbf{r}_l$ [11], элементы которых с учетом вышеизложенных замечаний имеют вид: $r_{jk}^{(l)} = \rho_{jk}^{(l)} \cos \varphi_{jk}^{(l)}$, где $\rho_{jk}^{(l)} = \rho(t_{l-j} - t_{l-k})$ – коэффициенты корреляции, $\varphi_{jk}^{(l)} = \varphi(t_{l-j} - t_{l-k})$ – доплеровская фаза помехи, $l = (m+1), (m+p)$ – номер периода повторения в пределах ядра вобуляции p , $j, k = 0, m$. Диапазон изменения l смещен на m для того, чтобы не учитывать переходной процесс в фильтре. Очевидно, что каждой l -й подматрице $\mathbf{r}_l$ соответствует оптимальный подвектор весовых коэффициентов $\mathbf{g}_l = \{g_k^{(l)}\}$.

С учетом вышеизложенного критерий оптимизации (1) может быть представлен в виде:

$$\mu_{l\max} = \max_{\mathbf{g}_l} (\mathbf{g}_l^T \mathbf{g}_l / \mathbf{g}_l^T \mathbf{r}_l \mathbf{g}_l).$$

Оптимальный подвектор $\mathbf{g}_l$ является собственным вектором подматрицы $\mathbf{r}_l$, соответствующим ее минимальному собственному значению $\alpha_{\min}^{(l)} = 1/\mu_{l\max}$ и определяемым из уравнения

$$(\mathbf{r}_l - \alpha_{\min}^{(l)} \mathbf{I}) \mathbf{g}_l = 0, \quad (2)$$

где $\mathbf{I}$ – единичная матрица, $\alpha_{\min}^{(l)}$ – наименьший корень характеристического уравнения

$$\det(\mathbf{r}_l - \mathbf{I} \alpha^{(l)}) = 0,$$

которое, в частности, для фильтра второго порядка ($m = 2$) может быть представлено в виде

$$(1 - \alpha^{(l)})^3 - (1 - \alpha^{(l)})[(r_{01}^{(l)})^2 + (r_{02}^{(l)})^2 + (r_{12}^{(l)})^2] + 2r_{01}^{(l)}r_{02}^{(l)}r_{12}^{(l)} = 0.$$

Данное уравнение является неполным кубическим и имеет три ненулевых корня, наименьший из которых в соответствии с тригонометрическим способом решения [12] принимает следующий вид:

$$\alpha_{\min}^{(l)} = 1 - 2\sqrt{a/3} \cos(\vartheta/3),$$

где

$$a = r_{01}^2 + r_{02}^2 + r_{12}^2, \quad \vartheta = \arccos[-b/2\sqrt{(a/3)^3}], \quad b = 2r_{01}r_{02}r_{12},$$

индексация по l для упрощения записи опущена.

В соответствии с экстремальными свойствами характеристических (собственных) чисел α матриц система уравнений (2), являясь системой $m+1$ однородных линейных уравнений с $m+1$ неизвестными, имеет следующие тождественные решения, отличные от тривиального (нулевого) [12]:

$$\mathbf{g}_k^{(l)} = C A_{Rov,k}^{(l)},$$

где C – произвольная константа, $A_{Rov,k}^{(l)}$ – алгебраическое дополнение элемента $\alpha_{Rov,k}^{(l)}$ в определителе системы уравнений (2), Rov – номер строки разложения, $Rov = 0, m$, $k = 0, m$.

При ограничивающем условии $g_0^{(l)} = g_0 = 1$ оптимальные весовые коэффициенты некурсивного режекторного фильтра определяются выражением

$$g_k^{(l)} = A_{Rov,k}^{(l)} / A_{0,k}^{(l)}, \quad k, Rov = \overline{0, m}. \quad (3)$$

Выражение (3) позволяет определить оптимальные действительные весовые коэффициенты для некурсивного режекторного фильтра произвольного порядка. В частности, для фильтра первого порядка ($m = 1$) весовые коэффициенты

$$g_0^{(l)} = g_0 = 1, \quad g_1^{(l)} = g_1 = -1;$$

для фильтра второго порядка

$$(m=2) - g_0^{(l)} = g_0 = 1, \quad g_1^{(l)} = -\frac{(1-\alpha_{\min}^{(l)})r_{01}^{(l)} - r_{12}^{(l)}r_{02}^{(l)}}{(1-\alpha_{\min}^{(l)})^2 - (r_{12}^{(l)})^2},$$

$$g_2^{(l)} = \frac{r_{01}^{(l)}r_{12}^{(l)} - (1-\alpha_{\min}^{(l)})r_{02}^{(l)}}{(1-\alpha_{\min}^{(l)})^2 - (r_{12}^{(l)})^2}.$$

Предлагаемый алгоритм учитывает изменение от периода к периоду коэффициентов $r_{jk}^{(l)}$, которое вызвано изменением интервала корреляции $\Delta t = t_{l-j} - t_{l-k}$ под воздействием вобуляции периода повторения. Таким образом, полученные весовые коэффициенты, в отличие от [8], являются переменными во времени, т. е. их значения в каждый момент времени будут изменяться в соответствии с вобуляцией периодов повторения аналогично алгоритмам работы [11]. Алгоритмы, описанные в [8], позволяют таким же образом найти частные алгоритмы с действительными весовыми коэффициентами, соответствующие случаю обработки эквидистантной последовательности.

Достижение предельной эффективности режектирования пассивной помехи в условиях априорной неопределенности возможно при адаптации фильтра к спектрально-корреляционным характеристикам помехи. В соответствии с адаптивным байесовским подходом [5] переход от оптимальных весовых коэффициентов к адаптивным осуществляется путем замены коэффициентов $r_{jk}^{(l)}$ их оценочными значениями $\hat{r}_{jk}^{(l)}$, по которым определяются искомые действительные весовые коэффициенты (ДВК) $\hat{g}_k^{(l)}$ АРФ.

Принципы построения АРФ с ДВК

Синтез структуры нерекурсивного режекторного фильтра осуществляется на основе системной функции в z -плоскости, которая для канонической формы АРФ с ДВК определяется как суперпозиция p частных системных функций следующим соотношением:

$$H(\{z_l\}) = \frac{1}{p} \sum_{l=m}^{p+m-1} \sum_{k=0}^m \hat{g}_k^{(l)} z_l^{-k}, \quad (4)$$

где $z_l = \exp(i \omega T_l)$.

Структурная схема АРФ с ДВК канонической формы строится аналогично структурной схеме АРФ с комплексными весовыми коэффициентами [8] путем соответствующего ее упрощения. При этом исключаются блоки оценивания доплеровской фазы помехи и комплексные перемножители и вводится перемножитель для весового коэффициента $\hat{g}_m^{(l)}$. Оценки $\hat{r}_{jk}^{(l)}$ определяются в соответствии с алгоритмом (3) и соответствующей структурной схемой измерителя.

Фильтры высоких порядков ($m > 2$) целесообразно реализовывать в виде каскадного включения звеньев 1-го и 2-го порядков. В этом случае переменными во времени весовыми коэффициентами будут обладать только звенья 2-го порядка. Переход от канонической реализации к каскадной осуществляется на основе соответствующего преобразования выражения (4). Системная функция в z -плоскости для каскадной реализации фильтра нечетного порядка имеет вид:

$$H(\{z_l\}) = \frac{1}{p} \sum_{l=m}^{p+m-1} (1 - z_l^{-1}) \times \sum_{n=1}^{(m-1)/2} (1 + \hat{h}_1^{(l,n)} z_l^{-1} + \hat{h}_2^{(l,n)} z_l^{-2}),$$

где коэффициенты $\hat{h}_1^{(l,n)}$, $\hat{h}_2^{(l,n)}$ каждого из n звеньев 2-го порядка могут быть выражены через коэффициенты $\hat{g}_k^{(l)}$. В частности, для АРФ 3-го порядка $\hat{h}_1^{(l)} = 1 + \hat{g}_1^{(l)}$, $\hat{h}_2^{(l)} = \hat{g}_2^{(l)}$.

Системная функция в z -плоскости для фильтра четного порядка принимает вид:

$$H(\{z_l\}) = \frac{1}{p} \sum_{l=m}^{p+m-1} \sum_{n=1}^{m/2} (1 + \hat{h}_1^{(l,n)} z_l^{-1} + \hat{h}_2^{(l,n)} z_l^{-2}).$$

Адаптация каждого последующего звена осуществляется по оценкам остатков помехи на выходе предыдущего звена.

Анализ предельной эффективности АРФ

На рис. 1 представлены зависимости предельной (без учета ошибок адаптации) эффективности μ опти-

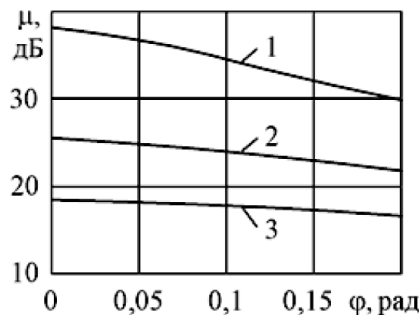


Рис. 1. Зависимости эффективности АРФ от доплеровской фазы помехи

мального режекторного фильтра второго порядка от доплеровской фазы помехи для ядра вобуляции $p = 8$ и глубины вобуляции $\text{mod} = 50\%$ при различных значениях нормированной ширины гауссовского спектра помехи $\beta = \Delta/T_{\min}$ [11]. Кривая 1 соответствует $\beta = 0,05$, кривая 2 – $\beta = 0,1$, кривая 3 – $\beta = 0,15$. Как видим, увеличение доплеровской фазы помехи приводит к снижению эффективности фильтра, что обусловлено адаптацией АРФ с ДВК к доплеровской фазе помехи путем взаимного смещения нулей передаточной функции без их общего поворота на угол, соответствующий доплеровскому сдвигу фазы помехи. Однако можно выделить некоторый диапазон малых значений фазы, в котором предельная эффективность изменяется незначительно. При этом рост ширины спектра помехи приводит к увеличению указанного диапазона. Это позволяет сделать вывод о целесообразности использования АРФ с ДВК в области малых доплеровских сдвигов фазы помехи.

Целесообразно сравнение фильтра с переменными во времени действительными весовыми коэффициентами по алгоритмам (3) и адаптивного фильтра [8] для частных алгоритмов с постоянными действительными весовыми коэффициентами в случае обработки неэквидистантной последовательности.

На рис. 2 представлены зависимости выигрыша в предельной эффективности $\Delta\epsilon$ предлагаемого алгоритма у частного стационарного алгоритма, описанного в справочнике [1], от параметров вобуляции для АРФ третьего порядка, $\beta = 0,05$ и ядра вобуляции $p = 2$ (сплошные кривые) и $p = 8$ (штриховые кривые). Кривые 1 соответствуют перекрестному закону вобуляции ($T_{2i-1} = T_{\min} + (i-1)\Delta T$, $T_{2i} = T_{\max} - (i-1)\Delta T$, $i = 1, \overline{p/2}$, где $T_{\max} = T_{\min} + (p-1)\Delta T$ [9]), кривые 2 – линейному закону вобуляции ($T_i = T_{\min} + (i-1)\Delta T$, $i = 1, \overline{p}$, где T_i – i -й период повторения).

Из представленных зависимостей видно, что при изменении межимпульсного интервала в пределах, соответствующих $1 \leq T_{\max}/T_{\min} \leq 1,5$, использование

переменных от периода к периоду весовых коэффициентов в зависимости от параметров вобуляции позволяет достичь выигрыша до 15 дБ. Увеличение ядра вобуляции приводит к уменьшению выигрыша. При стационарных параметрах фильтра изменение межимпульсного интервала приводит к существенному снижению эффективности режектирования пассивной помехи. Анализ аналогичных выигрышей в предельной эффективности предлагаемого алгоритма от нормированной ширины спектра помехи β показывает, что величина выигрыша также зависит от закона и параметров вобуляции периода повторения.

Заключение

Синтезированные алгоритмы с действительными весовыми коэффициентами позволяют существенно упростить структуру адаптивного режекторного фильтра, ограничивая область его целесообразного использования диапазоном малых доплеровских фаз помехи.

Проведенный анализ показывает, что предложенный алгоритм в зависимости от закона и параметров вобуляции периода повторения позволяет получить дополнительные выигрыши по сравнению с известными стационарными алгоритмами.

Режекторные фильтры с действительными весовыми коэффициентами могут с высокой эффективностью применяться в области малых доплеровских фаз помехи, позволяя при вобуляции периода повторения достичь желаемой линейности зоны прозрачности скоростных характеристик и обеспечивая эффективное выделение сигналов движущихся целей в значительно большем диапазоне их радиальных скоростей на фоне пассивных помех.

Литература

1. Skolnik, M. I. Radar Handbook / M.I. Skolnik. – 3rd ed. – New York : McGraw-Hill, 2008. – 1352 p.

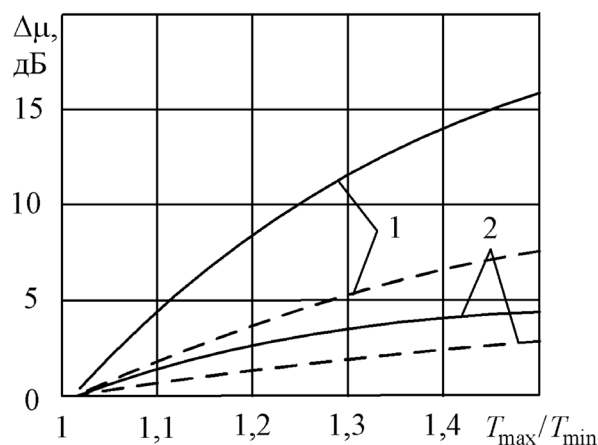


Рис. 2. Зависимости выигрышей в эффективности АРФ от параметров вобуляции

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. Репин, В. Г. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем / В.Г. Репин, Г.П. Тартаковский. – Москва : Советское радио, 1977. – 432 с.
6. Кузьмин, С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С.З. Кузьмин. – Киев : КВиЦ, 2000. – 428 с.
7. Цифровая обработка сигналов в многофункциональных радиолокаторах. Методы. Алгоритмы. Аппаратура: монография / под ред. Г.В. Зайцева. – Москва : Радиотехника, 2015. – 376 с.
8. Попов, Д. И. Адаптивная межпериодная обработка многочастотных сигналов / Д.И. Попов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2018. – № 64. – С. 17–22.
9. Попов, Д. И. Автокомпенсация доплеровской фазы многочастотных пассивных помех / Д.И. Попов // Вестник Рязанского государственного радио-технического университета. – 2018. – № 65. – С. 32–37.
10. Попов, Д. И. Обработка неэквидистантных сигналов на фоне пассивных помех / Д.И. Попов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2022. – № 80. – С. 24–31.
11. Попов, Д. И. Адаптивное режектирование неэквидистантных отсчетов пассивных помех / Д.И. Попов // Информация и Космос. – 2022. – № 2. – С. 35–40.
12. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн ; пер. с англ. под ред. И.Г. Арамановича. – Москва : Наука, 1973. – 832 с.