DOI 10.21778/2413-9599-2018-1-87-93 УДК 621.391:621.396.96

Д. И. Попов

Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань, Россия

УСТОЙЧИВОСТЬ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ РЕЖЕКТИРОВАНИЯ ПАССИВНЫХ ПОМЕХ

Статья посвящена исследованию адаптивных алгоритмов режекторных фильтров, обеспечивающих предельную эффективность подавления коррелированной (пассивной) помехи в условиях априорной параметрической неопределенности при вобуляции периода повторения. Целью статьи является анализ устойчивости алгоритмов расчета весовых коэффициентов режекторных фильтров и выработка рекомендаций по минимизации чувствительности этих алгоритмов к ошибкам вычислений. Приведен конкретный вид адаптивных алгоритмов, для которых проведен анализ устойчивости расчета весовых коэффициентов режекторных фильтров при вобуляции периода повторения зондирующих когерентных импульсов. Анализ устойчивости адаптивных алгоритмов по энергетическому критерию (коэффициенту улучшения отношения сигнал/помеха) в зависимости от выбора их основных параметров (строки и элемента разложения) позволяет оптимизировать данные параметры по критерию минимальной чувствительности алгоритмов к ошибкам математических вычислений. Даны рекомендации по выбору параметров алгоритмов расчета весовых коэффициентов, и предлагается процедура расчета модифицированных алгоритмов адаптивного режектирования пассивных помех при вобуляции периода повторения. В результате оптимизации алгоритмов по критерию постоянства производных установлено, что для обеспечения минимального значения нормы матрицы производных весовых коэффициентов при выбранном номере строки разложения предпочтение следует отдать выбору элемента (столбца) разложения с тем же номером.

Ключевые слова: *адаптация, алгоритмы режектирования, вобуляция периода повторения, пассивные помехи, устойчивость адаптивных алгоритмов.*

Для цитирования: Попов Д. И. Устойчивость адаптивных алгоритмов режектирования пассивных помех // Радиопромышленность. 2018. № 1. С. 87–93.

D. I. Popov

Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russia

SUSTAINABILITY OF ADAPTIVE ALGORITHMS FOR BAND REJECTION OF PASSIVE INTERFERENCES

The article is dedicated to the investigation of adaptive algorithms of band rejection filters, which ensure a top efficiency of suppression of correlated (passive) noise in conditions of a priori parametric uncertainty during wobbling of the repetition period. The purpose of the article is the analysis of the stability of algorithms for calculation of weight coefficients of rejection filters and development of recommendations for minimizing the sensitivity of these algorithms to calculation errors. A specific form of adaptive algorithms is given for which the analysis of stability of calculation of the weight coefficients of rejection filters in the wobbling of the repetition period of probing coherent pulses is carried out. Analysis of the stability of adaptive algorithms based on the energy criterion (the coefficient of improving the signal-to-noise ratio), depending on the choice of their basic parameters (rows and decomposition element), makes it possible to optimize these parameters by criterion of minimum sensitivity of algorithms to mathematical calculations errors. Recommendations are given on selection of parameters of the algorithms for calculating the weight coefficients and a procedure is proposed for calculating the modified algorithms for adaptive rejection of passive noise during the wobbling of the repetition period. As a result of optimization of algorithms by the criterion of constancy of derivatives it is established that in order to ensure a minimum value of the matrix of the derivative weight coefficients under the selected number of the expansion line, the preference should be given to selection of the element (column) of the expansion under the same number.

Keywords: *adaptation, algorithms for rejection, wobbling of the repetition period, passive interference, stability of adaptive algorithms.*

For citation: Popov D.I. Sustainability of adaptive algorithms for band rejection of passive interferences. Radiopromyshlennost, 2018, no. 1, pp. 87–93 (In Russian).

DOI 10.21778/2413-9599-2018-1-87-93

Введение

Обнаружение сигналов движущихся целей на фоне пассивных (коррелированных) помех является одной из актуальных и трудных задач, решаемых при проектировании и эксплуатации когерентно-импульсных радиолокационных систем [1–4]. Методы, алгоритмы и устройства цифровой обработки сигналов на фоне пассивных помех описаны в работах [5–7]. Априорная неопределенность спектрально-корреляционных характеристик помехи, а также их неоднородность и нестационарность в зоне обзора существенно затрудняют реализацию предельных возможностей обнаружения сигналов движущихся целей. Преодоление априорной неопределенности параметров помехи в соответствии с методологией адаптивного байесовского подхода основывается на методах адаптации к неизвестным корреляционным параметрам помехи – аргументу и модулю коэффициентов межпериодной корреляции – путем замены этих параметров их состоятельными оценками [8], что приводит к построению адаптивных алгоритмов и систем обработки [9–12], в частности, адаптивных режекторных фильтров [13].

Кроме априорной неопределенности существенно затрудняют реализацию эффективного обнаружения сигналов движущихся целей так называемые слепые скорости цели, когда спектральные линии сигнала и пассивной помехи совпадают. Одним из способов устранения слепых скоростей является изменение (вобуляция) периода повторения импульсов. Вобуляция улучшает условия обнаружения целей, движущихся со слепыми скоростями, но приводит к сужению полосы задерживания режекторных фильтров, что существенно снижает эффективность режектирования помехи. Чтобы этого избежать, используются переменные во времени в соответствии с законом вобуляции весовые коэффициенты режекторных фильтров [1]. При этом проблема отсутствия априорной информации о спектрально-корреляционных характеристиках помехи по-прежнему остается актуальной.

Адаптивные режекторные фильтры (АРФ), обеспечивающие предельную эффективность подавления коррелированной (пассивной) помехи в условиях априорной параметрической неопределенности при вобуляции периода повторения, синтезированы в работе [14]. Полученные в результате синтеза адаптивные весовые коэффициенты изменяются от периода к периоду с учетом временны́х свойств обрабатываемой вобулированной последовательности, т.е. являются коммутируемыми. При этом обеспечивается предельная эффективность подавления коррелированной помехи с априорно неизвестными спектрально-корреляционными свойствами. Однако очевидна сложность реализации указанных алгоритмов, вызванная необходимостью нахождения большого числа оценок параметров помехи и осуществления операций комплексного умножения.

При практической реализации адаптивных алгоритмов на цифровых процессорах обработки сигналов особую актуальность приобретает проблема устойчивости указанных алгоритмов. Под устойчивостью адаптивных алгоритмов режектирования пассивных помех будем понимать способность конкретного вида алгоритмов расчета весовых коэффициентов фильтра обеспечить нахождение такой весовой функции, которая позволит реализовать предельный или близкий к нему показатель эффективности при всех возможных значениях оцениваемых параметров и сопутствующих им ошибках вычислений в процессе адаптации.

Согласно методологии адаптивного байесовского подхода, весовой вектор АРФ определяется по оценкам максимального правдоподобия элементов корреляционной матрицы помехи на основе соответствующих функциональных зависимостей, в общем случае чувствительных к ошибкам математических вычислений, обусловленных конечной разрядностью цифровых устройств. Целью настоящей работы является анализ устойчивости алгоритмов расчета весовых коэффициентов АРФ и выработка рекомендаций по минимизации чувствительности этих алгоритмов к ошибкам вычислений.

Адаптивные алгоритмы режектирования пассивных помех

Синтез адаптивных алгоритмов режектирования пассивных помех при вобуляции периода повторения рассмотрен в работе [14]. При этом в общем виде получено выражение (3) для оптимальных весовых коэффициентов АРФ. Приведем конкретный вид адаптивных алгоритмов, вытекающих из выражения (3), для частных значений порядка АРФ^m:

$$m = 1 \Rightarrow g_0 = 1, g_1 = -1;$$

$$m = 2 \Rightarrow g_0 = 1,\ \hat{g}_1^{(l)} = -\frac{(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})^2 - (\hat{\rho}_{02}^{(l)})^2}{(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})\hat{\rho}_{01}^{(l)} - \hat{\rho}_{12}^{(l)}\hat{\rho}_{02}^{(l)}},$$

$$\hat{g}_2^{(l)} = \frac{(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})\hat{\rho}_{12}^{(l)} - \hat{\rho}_{01}^{(l)}\hat{\rho}_{02}^{(l)}}{(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})\hat{\rho}_{01}^{(l)} - \hat{\rho}_{12}^{(l)}\hat{\rho}_{02}^{(l)}};$$

$$m = 3 \Rightarrow \hat{g}_k = \hat{A}_{1k} / \hat{A}_{10},\ \ k = \overline{0, m},$$

$$\hat{A}_{10} = -(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})^2\hat{\rho}_{01}^{(l)} + (1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})(\hat{\rho}_{02}^{(l)}\hat{\rho}_{12}^{(l)} + \hat{\rho}_{03}^{(l)}\hat{\rho}_{13}^{(l)}) + \\ +\hat{\rho}_{01}^{(l)}(\hat{\rho}_{23}^{(l)})^2 - \hat{\rho}_{02}^{(l)}\hat{\rho}_{13}^{(l)}\hat{\rho}_{23}^{(l)} - \hat{\rho}_{12}^{(l)}\hat{\rho}_{03}^{(l)}\hat{\rho}_{23}^{(l)},$$

$$\hat{A}_{11} = (1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})^3 - (1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})[(\hat{\rho}_{02}^{(l)})^2 + (\hat{\rho}_{03}^{(l)})^2 + (\hat{\rho}_{23}^{(l)})^2] + 2\hat{\rho}_{12}^{(l)}\hat{\rho}_{03}^{(l)}\hat{\rho}_{23}^{(l)},$$

$$\hat{A}_{12} = -(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})^2\hat{\rho}_{12}^{(l)} + (1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})(\hat{\rho}_{01}^{(l)}\hat{\rho}_{02}^{(l)} + \hat{\rho}_{13}^{(l)}\hat{\rho}_{23}^{(l)}) + \\ +\hat{\rho}_{12}^{(l)}(\hat{\rho}_{03}^{(l)})^2 - \hat{\rho}_{01}^{(l)}\hat{\rho}_{23}^{(l)}\hat{\rho}_{03}^{(l)} - \hat{\rho}_{02}^{(l)}\hat{\rho}_{13}^{(l)}\hat{\rho}_{03}^{(l)},$$

$$\hat{A}_{13} = -(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})^2\hat{\rho}_{13}^{(l)} + (1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})(\hat{\rho}_{01}^{(l)}\hat{\rho}_{03}^{(l)} + \hat{\rho}_{12}^{(l)}\hat{\rho}_{23}^{(l)}) + \\ +\hat{\rho}_{13}^{(l)}(\hat{\rho}_{02}^{(l)})^2 - \hat{\rho}_{01}^{(l)}\hat{\rho}_{23}^{(l)}\hat{\rho}_{02}^{(l)} - \hat{\rho}_{12}^{(l)}\hat{\rho}_{02}^{(l)}\hat{\rho}_{03}^{(l)}.$$

Как видим, адаптивные алгоритмы при $m = 3$ крайне громоздки и, кроме того, зависят от оценок шести коэффициентов корреляции, поэтому в этом случае для упрощения процедуры адаптации целесообразно построение АРФ в виде каскадного соединения звеньев 1-го и 2-го порядков. Оценки корреляционных параметров помехи находятся в соответствии с максимально правдоподобными алгоритмами оценивания.

Сравнение эффективности АРФ на основе предложенных алгоритмов и АРФ со стационарными алгоритмами [13] показывает, что при изменении глубины вобуляции в пределах $\mathrm{mod} \leqslant 50\%$ в зависимости от параметров вобуляции достигаются существенные (до 15 дБ) выигрыши, соответствующие перекрестному закону вобуляции. При линейном законе вобуляции аналогичная величина выигрыша не превосходит 5 дБ. Данные выигрыши объясняются сочетанием адаптации к корреляционным характеристикам помехи и изменением весового вектора во времени. При этом актуальным является анализ устойчивости синтезированных адаптивных алгоритмов и выработка рекомендаций по минимизации чувствительности этих алгоритмов к ошибкам вычислений.

Анализ алгоритмов по энергетическому критерию

Первой причиной отличия адаптивных весовых коэффициентов $\hat{g}_k$, определяемых на основе выражения (3), от точного решения, соответствующего уравнению (2) работы [14], являются погрешности оценивания параметров корреляционной матрицы помехи. Однако даже при высокоточном оценивании остаются ошибки математических вычислений оценки минимального собственного значения $\alpha_{\min}$ корреляционной матрицы помехи $[\hat{\rho}_{jk}]$, обусловленные конечной разрядностью цифровых устройств при решении и определении наименьшего корня характеристического уравнения $\det[\hat{\rho}_{jk} - \alpha\delta_{jk}] = 0$. Наиболее простым и очевидным способом устранения указанных недостатков является пренебрежение значением оценки минимального собственного значения (т.е. положить, что $\alpha_{\min} = 0$), тем более оправданным для случая сильно коррелированных (узкополосных) помех, когда $\alpha_{\min} \to 0$. Получаемый при этом алгоритм оказывается приближенным, а соответствующий усредненный коэффициент μ улучшения отношения сигнал/помеха отличается от максимальной величины $\mu_{\max}$ [14], что соответствует проигрышу $\delta\mu = \mu / \mu_{\max}$.

Представляет интерес анализ проигрыша $\delta\mu$ приближенных алгоритмов АРФ (когда $\alpha_{\min} = 0$) по сравнению с точными, полученными из решения уравнения (2) работы [14], в зависимости от корреляционных свойств помехи при выборе различных значений номера строки разложения Row. Анализ проведем для перекрестного закона вобуляции, восьмикратной ($p = 8$) вобуляции периода повторения и глубине вобуляции $\mathrm{mod} = 25\%$.

При выборе различных значений Row в расчет будут приниматься только первые $]m/2[$ строк (где $]\cdot[$ означает целую часть числа, m – порядок фильтра), поскольку $\delta\mu(Row) = \delta\mu(m - Row)$. Это свойство можно показать на примере фильтра 1-го порядка ($m = 1$). При этом точному алгоритму соответствуют весовые коэффициенты

$$g_0 = 1,\ g_1 = -1 \Rightarrow \mu = 1/\alpha_{\min} = 1/(1-\rho_{01}),$$

приближенному алгоритму при $Row = 0$ – коэффициенты

$$g_0 = 1,\ g_1 = -\rho_{01} \Rightarrow \mu = (1+\rho_{01}^2)/(1-\rho_{01}^2),$$

а при $Row = m - 0 = 1$ –

$$g_0 = 1,\ g_1 = -1/\rho_{01} \Rightarrow \mu = (1+\rho_{01}^2)/(1-\rho_{01}^2).$$

Тогда имеющая одинаковый вид при $Row = 0$ и $Row = 1$ результирующая функция проигрыша

$$\delta\mu(Row = 0) = \delta\mu(Row = 1) = (1+\rho_{01}^2)/(1+\rho_{01})$$

достигает минимума в точке $\rho_{01} = \sqrt{2} - 1 \approx 0{,}414$, а значение проигрыша $\delta\mu$ при этом равно $\delta\mu = 2(\sqrt{2}-1) \approx 0{,}828$ (–0,817 дБ).

На рис. 1 при $Row = 0$ и на рис. 2 при $Row = 1$ представлены соответствующие зависимости проигрыша $\delta\mu$ приближенных алгоритмов расчета весовых коэффициентов АРФ от коэффициента корреляции $\rho = \rho_{\min} = \rho(T_{\min})$ пассивной помехи с гауссовской (сплошные кривые) и экспоненциальной (штриховые кривые) функциями корреляции.

Как видим, выбор строки разложения оказывает значительное влияние на величину рассматриваемых потерь, максимальное значение которых достигается, как и следовало ожидать, при средних значениях коэффициента корреляции $0{,}4 < \rho < 0{,}8$. Причем для помехи с гауссовской функцией корреляции потери быстро уменьшаются практически до нуля при $\rho \to 1$, в то время как для помехи с экспоненциальной функцией аналогичная ситуация имеет место только при $m = 2$ для $Row = 1$.

Существенное влияние выбора строки разложения на величину данных потерь объясняется тем, что алгебраические дополнения A_{jk} в алгоритме (3) работы [14] являются полиномами от переменной $(1 - \alpha_{\min})$, причем при $j = k$ – это полином m-й степени, а при $j \neq k$ – $(m - 1)$-й степени. По этой причине при выборе строки разложения $Row = 1$ потери, обусловленные неучетом значения $\alpha_{\min}$, намного меньше потерь, обусловленных выбором нулевой строки разложения $Row = 0$, для выбранного значения элемента разложения $Col = 0$. Заметим, что для случая постоянного периода повторения выбор $Row = 1$ приводит к упрощению конкретного вида алгоритмов за счет теплицевых свойств корреляционной матрицы помехи, при этом устраняется эффект неопределенности типа «0/0» в расчете весовых коэффициентов при $\rho \to 1$ [13].

Наличие существенных потерь при $\rho \to 1$ для помехи с экспоненциальной функцией корреляции по сравнению с гауссовской функцией обусловлено тем, что при одном и том же значении ρ величина $\alpha_{\min}$ для помехи с экспоненциальной функцией на порядок превышает значение $\alpha_{\min}$ для помехи с гауссовской функцией и, следовательно, неучет этого значения для помехи с экспоненциальной функцией приводит к более существенным потерям в эффективности. Кроме того, неучет значения $\alpha_{\min}$ в случае экспоненциальной функции корреляции помехи приводит к тому, что вследствие ленточной структуры обратной корреляционной матрицы помехи часть весовых коэффициентов $g_k = 0$ при $k \geqslant 2$.

Обобщая вышеизложенное, можно дать следующие основные рекомендации по выбору параметров алгоритмов расчета весовых коэффициентов АРФ:

- При расчете весовых коэффициентов АРФ необходимым условием достижения предельной эффективности режектирования является использование оценки минимального собственного значения корреляционной матрицы пассивной помехи, которая является своеобразным стабилизирующим элементом расчета, причем для минимизации потерь, вызванных ошибками оценивания $\alpha_{\min}$, в качестве строки разложения следует выбрать первую строку $Row = 1$.
- Для сохранения потенциальной точности расчета всех весовых коэффициентов предлагается следующая процедура расчета:

$$\hat{g}_0 = g_0 = 1;\;\; \hat{g}_1 = -\frac{1}{1-\alpha_{\min}}\left(\hat{\rho}_{01} + \sum_{k=2}^{m} \hat{\rho}_{1j}\hat{g}_k\right);$$

$$\hat{g}_k = \frac{\hat{A}_{1k}}{\hat{A}_{10}},\;\; k = \overline{2, m},$$

при которой все весовые коэффициенты являются полиномами одинаковой $(m - 1)$-й степени относительно переменной $(1 - \alpha_{\min})$.

С учетом приведенных рекомендаций модифицированные алгоритмы адаптивного режектирования пассивных помех при вобуляции периода повторения принимают следующий вид:

$$\text{при } m = 1 \Rightarrow g_0 = 1,\; g_1 = -1;$$

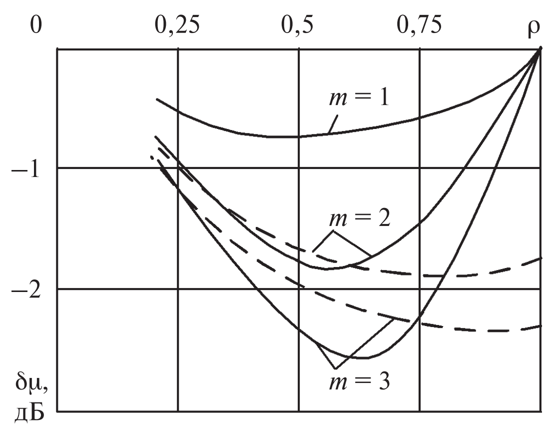

Рисунок 1. Зависимости проигрыша приближенных алгоритмов при *Row* = 0

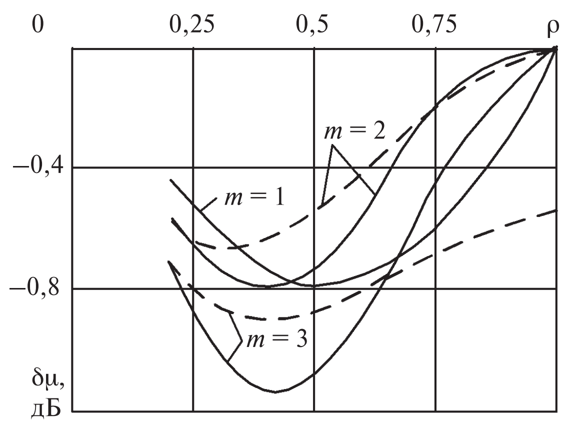

Рисунок 2. Зависимости проигрыша приближенных алгоритмов при *Row* = 1

при $m=2 \Rightarrow g_0=1,\ \hat{g}_1^{(l)}=-\frac{1}{1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)}}(\hat{\rho}_{01}^{(l)}+\hat{\rho}_{12}^{(l)}\hat{g}_2^{(l)}),$

$$\hat{g}_2^{(l)}=\frac{(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})\hat{\rho}_{12}^{(l)}-\hat{\rho}_{01}^{(l)}\hat{\rho}_{02}^{(l)}}{(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})\hat{\rho}_{01}^{(l)}-\hat{\rho}_{12}^{(l)}\hat{\rho}_{02}^{(l)}};$$

при $m=3 \Rightarrow g_0=1,\ \hat{g}_1^{(l)}=-\frac{1}{1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)}}(\hat{\rho}_{01}^{(l)}+\hat{\rho}_{12}^{(l)}\hat{g}_2^{(l)}+\hat{\rho}_{13}^{(l)}\hat{g}_3^{(l)}),$

$$\hat{g}_2^{(l)}=(1/\hat{A})[(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})^2\hat{\rho}_{12}^{(l)}-(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})(\hat{\rho}_{01}^{(l)}\hat{\rho}_{02}^{(l)}+\hat{\rho}_{13}^{(l)}\hat{\rho}_{23}^{(l)})+$$
$$+\hat{\rho}_{03}^{(l)}(\hat{\rho}_{01}^{(l)}\hat{\rho}_{23}^{(l)}+\hat{\rho}_{02}^{(l)}\hat{\rho}_{13}^{(l)}-\hat{\rho}_{12}^{(l)}\hat{\rho}_{03}^{(l)})],$$

$$\hat{g}_3^{(l)}=(1/\hat{A})[(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})^2\hat{\rho}_{13}^{(l)}-(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})(\hat{\rho}_{01}^{(l)}\hat{\rho}_{03}^{(l)}+\hat{\rho}_{12}^{(l)}\hat{\rho}_{23}^{(l)})+$$
$$+\hat{\rho}_{02}^{(l)}(\hat{\rho}_{01}^{(l)}\hat{\rho}_{23}^{(l)}+\hat{\rho}_{12}^{(l)}\hat{\rho}_{03}^{(l)}-\hat{\rho}_{02}^{(l)}\hat{\rho}_{13}^{(l)})],$$

$$\hat{A}=(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})^2\hat{\rho}_{01}^{(l)}-(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})(\hat{\rho}_{02}^{(l)}\hat{\rho}_{12}^{(l)}+\hat{\rho}_{03}^{(l)}\hat{\rho}_{13}^{(l)})+$$
$$+\hat{\rho}_{23}^{(l)}(\hat{\rho}_{02}^{(l)}\hat{\rho}_{13}^{(l)}+\hat{\rho}_{12}^{(l)}\hat{\rho}_{03}^{(l)}-\hat{\rho}_{01}^{(l)}\hat{\rho}_{23}^{(l)}).$$

Громоздкость выражений при $m = 3$ подтверждает целесообразность использования на практике каскадного включения звеньев 1-го и 2-го порядков.

Анализ алгоритмов по критерию постоянства производных

Введем матрицу производных весовых коэффициентов $\mathbf{B}=[B_{rs}]$, где $B_{rs}=\partial g_r/\partial\rho_s$, и рассмотрим в качестве меры проигрыша столбцевую норму [15] данной матрицы

$$D=\|\mathbf{B}\|=\sup_s\sum_{r=0}^{m}|B_{rs}|,\ s=\overline{0,M-1},$$

где $M=m(m+1)/2$; $s=\mathbf{T}(j,k)=\mathbf{T}(k,j)$ – индекс, определяемый как $\mathbf{T}(\cdot)$ – преобразование, ставящее в соответствие паре неравных друг другу индексов единственный порядковый номер и имеющее следующий вид:

$$\mathbf{T}(j,k)=\mathbf{T}(k,j)=\min(j,k)+\frac{[\max(j,k)-1]\max(j,k)}{2}.$$

Рассмотрим вначале фильтр 1-го порядка. В этом случае точному алгоритму соответствуют весовые коэффициенты

$$g_0=1,\ g_1=-1\Rightarrow D\equiv 0,$$

приближенному алгоритму при $Row = 0$ – коэффициенты

$$g_0=1,\ \hat{g}_1=-\hat{\rho}_{01}\Rightarrow D=1,$$

а при $Row = 1$ –

$$g_0=1,\ \hat{g}_1=-1/\hat{\rho}_{01}\Rightarrow D=1/\hat{\rho}_{01}^2.$$

Как видим, приближенные алгоритмы приводят к более резкой зависимости нормы матрицы производных от корреляционных свойств помехи, при этом чем больше номер строки разложения Row, тем резче проявляется эта зависимость.

Анализ аналогичных зависимостей для фильтров 2-го и 3-го порядков показывает, что при средних значениях коэффициента корреляции $0{,}4<\rho<0{,}8$ норма матрицы производных остается практически постоянной и резко возрастает (в пределе до бесконечности) при $\rho\to 0$ или $\rho\to 1$, причем чем меньше номер строки разложения Row, тем меньше соответствующая ей норма D. Заметим, что значения D при нулевой и первой строках разложения отличаются не более чем в два раза. Резкое возрастание величины D при $\rho\to 0$ или $\rho\to 1$ объясняется тем, что, как видно из выражения (3) работы [14], норма матрицы производных обратно пропорциональна квадрату нормировочного коэффициента $A_{Row,Col}$, а для фильтров 2-го и 3-го порядков $A_{Row,Col}\to 0$ при $\rho\to 0$ или $\rho\to 1$. Отметим, что даже при учете значения $\alpha_{\min}$ в расчете весовых коэффициентов по алгоритму (3) работы [14] норма D возрастает также до бесконечности при $\rho\to 0$ или $\rho\to 1$.

При $\rho\to 1$ единственной причиной отличия получающегося весового вектора от точного решения является плохая обусловленность корреляционной матрицы пассивной помехи (определяемая отношением максимального собственного значения к минимальному $\alpha_{\max}/\alpha_{\min}$), не позволяющая обратить ее с заданной точностью. При увеличении разрядной сетки ЭВМ, вычисляющей оптимальный весовой вектор, можно добиться приемлемой точности обращения, однако всегда имеется такое предельное значение обусловленности, превышение которого приводит к недопустимым погрешностям и снижению выходного отношения сигнал/помеха. Во втором случае (при $\rho\to 0$) причиной снижения точности вычислений является эффект потери значащих цифр при манипуляции с операндами, близкими к нулю. Из изложенного следует, что разрядная сетка ЭВМ при обращении корреляционной матрицы помехи в алгоритме (3) работы [14] должна выбираться с учетом допустимого диапазона обусловленности корреляционной матрицы пассивной помехи.

Отметим, что требования по минимизации проигрыша по энергетическому критерию ($Row = 1$) и требования по обеспечению минимального значения нормы матрицы производных весовых коэффициентов ($Row = 0$) вступают в некоторое противоречие. Однако, как было отмечено, значения нормы D для строк разложения $Row = 0$ и $Row = 1$ отличаются не более чем в два раза, кроме того, в случае постоянного периода повторения выбор $Row = 1$ при элементе разложения $Col = 1$ приводит к существенному упрощению конкретного вида алгоритмов адаптивного подавления пассивных помех [13], например, для $m = 2$ имеем

$$g_0 = g_2 = 1,\ \hat{g}_1 = -\frac{2\hat{\rho}_{01}}{1-\hat{\alpha}_{\min}}.$$

Заметим также, что существует компромиссное решение, сочетающее в себе минимальное значение проигрыша по энергетическому критерию эффективности и минимальное значение нормы матрицы производных весовых коэффициентов. Оно заключается в выборе $Row = 1$ для элемента разложения $Col = 1$ (т.е. $g_1 = 1$). В частности, для фильтра 2-го порядка имеем следующий конкретный вид алгоритмов:

$$\hat{g}_0^{(l)} = -\frac{(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})\hat{\rho}_{01}^{(l)} - \hat{\rho}_{02}^{(l)}\hat{\rho}_{12}^{(l)}}{(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})^2 - (\hat{\rho}_{02}^{(l)})^2},\ \hat{g}_1^{(l)} = g_1 = 1,$$

$$\hat{g}_2^{(l)} = -\frac{(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})\hat{\rho}_{12}^{(l)} - \hat{\rho}_{02}^{(l)}\hat{\rho}_{01}^{(l)}}{(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)})^2 - (\hat{\rho}_{02}^{(l)})^2},$$

который в случае постоянного периода повторения с учетом теплицевых свойств корреляционной матрицы пассивной помехи принимает также более упрощенный вид:

$$\hat{g}_0 = \hat{g}_2 = -\frac{\hat{\rho}_{01}}{(1-\hat{\alpha}_{\min}^{(l)}) + \hat{\rho}_{02}},\ \hat{g}_1 = g_1 = 1.$$

Заключение

Проведенный по энергетическому критерию анализ устойчивости алгоритмов адаптивного режектирования пассивных помех в зависимости от выбора их основных параметров (строки и элемента разложения) позволяет оптимизировать данные параметры по критерию минимальной чувствительности алгоритмов к ошибкам математических вычислений, причем конкретные в зависимости от порядка РФ функциональные соотношения – алгоритмы расчета весовых коэффициентов фильтра – являются полиномами одинаковой и минимально возможной степени.

При практической реализации алгоритмов расчета весовых коэффициентов АРФ с целью упрощения процедуры адаптации преимущественно следует использовать алгоритмы и звенья 1-го и 2-го порядков или их каскадное включение.

В результате оптимизации алгоритмов по критерию постоянства производных установлено, что для обеспечения минимального значения нормы матрицы производных весовых коэффициентов при выбранной строке разложения Row предпочтение следует отдать выбору элемента (столбца) разложения $Col = Row$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Radar Handbook / In: M.I. Skolnik, ed. 3rd ed. McGraw-Hill, 2008, 1352 p.
2. Richards M.A., Scheer J.A., Holm W.A. (Eds.). Principles of Modern Radar: Basic Principles. NY: SciTech Publishing, IET, Edison, 2010, 924 p.
3. Melvin W.L. Scheer J.A. (Eds.) Principles of Modern Radar: Advanced Techniques. NY: SciTech Publishing, IET, Edison, 2013, 846 p.
4. Richards M.A. Fundamentals of Radar Signal Processing, 2nd ed. NY: McGraw-Hill Education, 2014, 618 p.
5. Цифровая обработка сигналов в многофункциональных радиолокаторах. Методы. Алгоритмы. Аппаратура: монография / под ред. Г.В. Зайцева. М.: Радиотехника, 2015. 376 с.
6. Лозовский И.Ф. Цифровая обработка сигналов в РЛС обзора: монография. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 270 с.
7. Радиолокационные системы / В.В. Ахияров, С.И. Нефедов, А.И. Николаев, Г.П. Слукин, И.Б. Федоров, В.Ю. Шустиков. М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2016. 352 с.
8. Репин В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М.: Советское радио, 1977. 432 с.
9. Попов Д.И. Адаптивная обработка сигналов на фоне пассивных помех // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2000. Т. 43. № 1 (451). С. 59–68.
10. Родионов В.В. Помехоустойчивость адаптивных импульсно-доплеровских обнаружителей на фоне пассивных помех // Антенны. 2014. № 1 (200). С. 23–29.
11. Andreyev V.G., Nguyen T.P. Adaptive Processing of Signals on a Background of Clutter and Noise. Radioelectronics and Communications Systems, 2015, vol. 58, no. 2, pp. 85–89.
12. Лозовский И.Ф. Построение и эффективность адаптивной обработки сигналов в условиях воздействия комбинированных помех // Успехи современной радиоэлектроники. 2016. № 1. С. 52–58.
13. Попов Д.И. Адаптация нерекурсивных режекторных фильтров // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2009. Т. 52. № 4. С. 46–55.
14. Попов Д.И. Режектирование пассивных помех при вобуляции периода повторения // Радиотехника. 2015. № 5. С. 97–101.
15. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. 832 с.

REFERENCES

1. Radar Handbook. In: M.I. Skolnik, ed. 3rd ed. McGraw-Hill, 2008, 1352 p.
2. Richards M.A., Scheer J.A., Holm W.A. (Eds.). Principles of Modern Radar: Basic Principles. NY: 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. Richards M.A. Fundamentals of Radar Signal Processing, 2nd ed. NY: McGraw-Hill Education, 2014, 618 p.
5. *Cifrovaja obrabotka signalov v mnogofunkcional'nyh radiolokatorah. Metody. Algoritmy. Apparatura: monografija* [Digital signal processing in multifunctional radars. Methods. Algorithms.Equipment: a monograph]. In: G.V. Zaytsev, ed. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2015, 376 p. (In Russian).
6. Lozovskiy I.F. *Cifrovaja obrabotka signalov v RLS obzora: monografija* [Digital signal processing in the radar survey: monograph]. Novosibirsk, Izdatelstvo NGTU Publ., 2016, 270 p. (In Russian).
7. Akhiyarov V.V., Nefedov S.I., Nikolaev A.I., Slukin G.P., Fedorov I.B., Shustikov V. Yu. *Radiolokacionnye sistemy* [Radar systems]. Moscow, Izdatelstvo MGTU im. N.E. Baumana, 2016, 352 p. (In Russian).
8. Repin V.G., Tartakovskiy G.P. *Statisticheskij sintez pri apriornoj neopredelennosti i adaptacija informacionnyh sistem* [Statistical synthesis with a priori uncertainty and adaptation of information systems]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1977, 432 p. (In Russian).
9. Popov D.I. Adaptive signal processing on the background of passive interference. *Izvestiya vuzov. Radioelektronika,* 2000, vol. 43, no. 1 (451), pp. 59–68 (In Russian).
10. Rodionov V.V. Noise immunity of adaptive pulse-Doppler detectors on the background of passive interference. *Antenny,* 2014, no. 1 (200), pp. 23–29 (In Russian).
11. Andreev V.G., Nguyen T.P. Adaptive Processing of Signals on a Background of Clutter and Noise. *Radioelectronics and Communications Systems,* 2015, vol. 58, no. 2, pp. 85–89 (In Russian).
12. Lozovskiy I.F. Construction of and efficiency of adaptive signal processing under conditions of combined jamming effect. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki,* 2016, no. 1, pp. 52–58 (In Russian).
13. Popov D.I. Adaptation of non-recursive notch filters. *Izvestiya vuzov. Radioelektronika,* 2009, vol. 52, no. 4, pp. 46–55 (In Russian).
14. Popov D.I. Rejection of passive jamming in case of wobbling of the repetition period. *Radiotekhnika,* 2015, no. 5, pp. 97–101 (In Russian).
15. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov* [A manual on mathematics for researchers and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1973, 832 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Попов Дмитрий Иванович, д.т.н., профессор, Рязанский государственный радиотехнический университет, 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1, тел.: 8 (4912) 46-03-59, e-mail: adop@mail.ru.

AUTHOR

Popov Dmitriy, Dr., professor, Ryazan State Radio Engineering University, 59/1, ulitsa Gagarina, Ryazan, 390005, Russian Federation, tel.: +7 (4912) 46-03-59, e-mail: adop@mail.ru.