

УДК 621.391:621.396.96

Анализ режекторных фильтров при wobulation периода повторения

Analysis of rejection filters during the wobble of the repetition period

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 – analysis; адаптация – adaptation; алгоритмы режектирования – rejection algorithms; весовые коэффициенты – weight coefficients; wobulation периода повторения – wobulation of repetition period; пассивные помехи – passive interference; эффективность режектирования – rejection efficiency.

Рассмотрена задача анализа нерекурсивных режекторных фильтров с действительными весовыми коэффициентами, осуществляющими адаптивное режектирование пассивной помехи при wobulation периода повторения. Установлены выигрыши в предельной эффективности режектирования пассивных помех данными фильтрами по сравнению с известными. На основе асимптотических свойств оценок максимального правдоподобия проведен анализ сходимости адаптивных алгоритмов и величины потерь, вызванных ограниченностью объема обучающей выборки. Показано, что применение в адаптивных режекторных фильтрах действительных весовых коэффициентов позволяет существенно сократить потери, обусловленные ошибками адаптации, и тем самым уменьшить объем обучающей выборки.

The problem of analyzing non-recursive rejection filters with the actual weights, performing adaptive rejection clutter wobulation repetition period is considered. In the marginal efficiency gains rejection clutter data filters in comparison with the known has been installed. On the basis of the asymptotic properties of the maximum likelihood estimates of the analysis of the convergence of adaptive algorithms and the magnitude of losses, caused by the limited scope of the training sample. It is shown, that the use of adaptive notch filters in real weighting factors can significantly reduce loss due to adaptation errors and thus reduce the amount of training sample.

Введение

Выделение сигналов движущихся целей на фоне коррелированных (пассивных) помех, обусловленных мешающими отражениями, является одной из акту-

альных и трудных задач обработки поступающих данных, решаемых в когерентно-импульсных радиолокационных системах высокой скважности [1–6]. Отсутствие априорной информации о спектрально-корреляционных характеристиках помехи, а также их неоднородность и нестационарность в зоне обзора существенно затрудняют реализацию предельных возможностей основной операции выделения сигналов движущихся целей – режектирования спектральных составляющих помехи. 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 [7, 8], что приводит, в частности, к алгоритмам адаптивного режектирования с комплексными весовыми коэффициентами и соответствующим адаптивным режекторным фильтрам (АРФ) [9, 10]. Реализация данных АРФ в цифровом виде требует высокого быстродействия выполнения арифметических операций. Избежать указанных трудностей можно путем предварительной компенсации доплеровского сдвига фазы помехи. В работе [11] синтезированы алгоритмы оценивания и предложены принципы построения и структурные схемы автокомпенсаторов доплеровской фазы пассивных помех с прямой связью.

Кроме априорной неопределенности существенно затрудняют реализацию эффективного обнаружения сигналов движущихся целей так называемые слепые скорости цели, когда спектральные линии сигнала и коррелированной помехи совпадают. Одним из способов устранения слепых скоростей является изменение (wobulation) периода повторения импульсов [5, 12]. Wobulation улучшает условия обнаружения целей, движущихся со слепыми скоростями, но приводит к сужению полосы задерживания режекторных филь-

тров, что существенно снижает эффективность режекторирования помехи. Чтобы этого избежать, используются переменные во времени в соответствии с законом вобуляции весовые коэффициенты РФ [5]. При этом проблема отсутствия априорной информации о спектрально-корреляционных характеристиках помехи по-прежнему остается актуальной.

Адаптивные режекторные фильтры, обеспечивающие предельную эффективность подавления коррелированной помехи в условиях априорной параметрической неопределенности, синтезированы в работе [13]. При этом корреляционная матрица обрабатываемой последовательности рассматривается как совокупность подматриц, каждая из которых соответствует определенному периоду повторения. На основе критерия максимизации усредненного по множеству возможных скоростей цели коэффициента улучшения отношения сигнал-помеха получены выражения, позволяющие в каждом периоде повторения определить весовые коэффициенты режекторного фильтра, обеспечивающего предельное подавление коррелированной помехи. Полученные в результате синтеза весовые коэффициенты изменяются от периода к периоду с учетом временных свойств обрабатываемой вобулированной последовательности, т. е. являются коммутруемыми. 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. Использование в АРФ действительных весовых коэффициентов (ДВК) позволяет существенно упростить его структуру [14].

В связи с этим представляет интерес анализ АРФ с действительными весовыми коэффициентами при

вобуляции периода повторения в зависимости от объема обучающей выборки.

Выигрыши в предельной эффективности АРФ с ДВК

Рассмотрим обработку последовательности отсчетов, которые при вобуляции периода повторения образуют ядро вобуляции, состоящее из p неэквидистантных или неравных временных интервалов $T_1, T_2, \dots, T_l, \dots, T_p$ и повторяющееся с постоянным периодом T_B , называемым периодом вобуляции. В пределах периода вобуляции T_B свойства помехи будем описывать p корреляционными подматрицами \mathbf{R}_l , элементы которых

$$R_{jk}^{(l)} = \rho_{jk}^{(l)} \exp(i\psi_{jk}^{(l)}),$$

где $\rho_{jk}^{(l)} = \rho(t_{l-j} - t_{l-k})$ – коэффициенты межпериодной корреляции, $\psi_{jk}^{(l)} = \psi(t_{l-j} - t_{l-k})$ – доплеровские сдвиги фазы, $j, k = 0, m, l = (m+1), (m+p), m$ – порядок АРФ.

С учетом использования в рассматриваемом фильтре подвектора действительных весовых коэффициентов $\mathbf{g}_l = \{g_k^{(l)}\}, k = 0, m$, критерий его эффективности, соответствующий усредненному по доплеровской фазе сигнала коэффициенту улучшения отношения сигнал/помеха [14], принимает вид:

$$\mu_l = \mathbf{g}_l^T \mathbf{g}_l / \mathbf{g}_l^T \mathbf{r}_l \mathbf{g}_l, \quad (1)$$

где \mathbf{r}_l – корреляционная подматрица помехи, элементы которой задаются выражением $r_{jk}^{(l)} = \text{Re } R_{jk}^{(l)} = \rho_{jk}^{(l)} \cos \psi_{jk}^{(l)}$.

По критерию максимума выражения (1) в работе [14] рассмотрен синтез оптимального подвектора весовых коэффициентов $\mathbf{g}_l = \{g_k^{(l)}\}$, соответствующего каждой l -й подматрице пассивной помехи \mathbf{r}_l .

Проведем анализ синтезированных алгоритмов по вытекающему из выражения (1) критерию эффек-

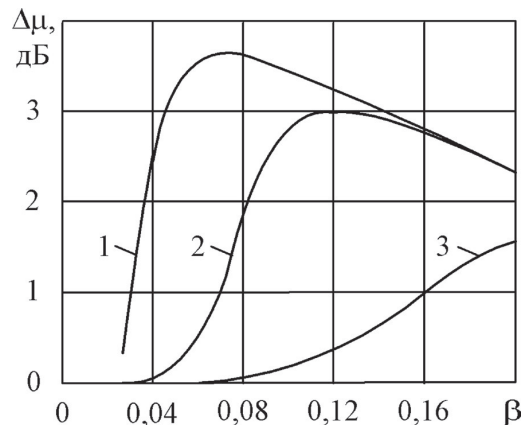


Рис. 1. Зависимости выигрышей в предельной эффективности АРФ

тивности. В качестве результирующего усредненного коэффициента улучшения сигнала/помехи при p -кратной вобуляции периода повторения примем суперпозицию p частных коэффициентов улучшения:

$$\mu = \frac{1}{p} \sum_{l=m+1}^{m+p} \mu_l = \sum_{l=m+1}^{m+p} (\mathbf{g}_l^T \mathbf{g}_l / \mathbf{g}_l^T \mathbf{r}_l \mathbf{g}_l).$$

В работе [14] показано, что при величине нормированной ширины спектра помехи $\beta \rightarrow 0$ АРФ с комплексными весовыми коэффициентами (КВК) эквивалентен фильтру, реализованному на основе действительных весовых коэффициентов по неадаптивным алгоритмам книги [5]. В связи с этим представляет интерес сравнение данных алгоритмов и алгоритмов АРФ с ДВК [14] при режектировании пассивной помехи.

На рис. 1 представлены зависимости выигрыша $\Delta\mu$ в предельной эффективности АРФ с ДВК по сравнению с алгоритмами [5] от нормированной ширины спектра помехи β при $m=3$, линейной вобуляции, $p=8$, ядре вобуляции $\text{mod}=60\%$, глубине вобуляции и различных значениях отношения шум/помеха λ (кривая 1 соответствует $\lambda=10^{-6}$, кривая 2 – $\lambda=10^{-4}$, кривая 3 – $\lambda=10^{-2}$).

При $\beta \rightarrow 0$ оба алгоритма обеспечивают приблизительно одинаковую эффективность режектирования, что подтверждается отсутствием соответствующего выигрыша в эффективности, однако с ростом ширины спектра помехи АРФ с ДВК превосходит известные алгоритмы [5], так как наряду с компенсацией потерь, вызванных вобуляцией периода повторения, обеспечивает адаптивное режектирование помехи.

Сходимость адаптивных алгоритмов

В условиях априорной параметрической неопределенности необходимым, но не достаточным условием достижения описанных выигрышей является адаптация фильтра к спектрально-корреляционным характеристикам помехи. Для адаптации фильтра m -го порядка с действительными весовыми коэффициентами при неизвестной форме корреляционной функции помехи требуется оценивать $H = m(m+1)/2$ коэффициентов r_{jk} . Это вызывает необходимость иметь p обучающих периодов, образующих в пределах n смежных элементов по дальности обучающую выборку в виде совокупности n независимых векторов $\mathbf{U}_s^{(l)} = \{U_{js}^{(l)}\}$, $U_{js}^{(l)} = x_{js}^{(l)} + iy_{js}^{(l)}$, $j = \overline{0, p}$, $s = \overline{1, n}$. При этом оценки максимального правдоподобия (ОМП) искомых коэффициентов с учетом вобуляции периода повторения аналогично работе [10] принимают вид:

$$\begin{aligned} \hat{r}_{jk}^{(l)} &= \text{Re } \hat{R}_{jk}^{(l)} = \\ &= \text{Re} \sum_{s=1}^n U_{js}^{*(l)} U_{ks}^{(l)} / \sqrt{\sum_{s=1}^n |U_{js}^{(l)}|^2 \sum_{s=1}^n |U_{ks}^{(l)}|^2} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \left(\sum_{s=1}^n (x_{js}^{(l)} x_{ks}^{(l)} + y_{js}^{(l)} y_{ks}^{(l)}) \right) \times \\ &\times \left(\sqrt{\sum_{s=1}^n ((x_{js}^{(l)})^2 + (y_{js}^{(l)})^2) \sum_{s=1}^n ((x_{ks}^{(l)})^2 + (y_{ks}^{(l)})^2)} \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Точность оценивания коэффициентов $\hat{r}_{jk}^{(l)}$ по алгоритму (2), а, следовательно, и предельная эффективность фильтра, определяются объемом обучающей выборки n .

Рассмотрим влияние объема обучающей выборки на эффективность нерекурсивного АРФ с ДВК. В качестве параметра, позволяющего оценить эффективность фильтра, примем вытекающую из критерия (1) величину, обратную коэффициенту подавления помехи η_l в l -м периоде повторения:

$$\eta_l^{-1} = \mathbf{g}_l^T \mathbf{r}_l \mathbf{g}_l, \quad (3)$$

где \mathbf{g}_l – вектор действительных весовых коэффициентов в l -м периоде повторения, \mathbf{r}_l – матрица коэффициентов $r_{jk}^{(l)}$ в l -м периоде повторения, которая, как показано в [13], для унимодальной помехи при вобуляции периода повторения не является теплицевой.

Переходя к оценочным значениям, выражение (3) можно представить в виде:

$$\hat{\eta}_l^{-1} = \sum_{j,k=0}^m g_j(\{\hat{r}_i\}) g_k(\{\hat{r}_i\}) r_{jk} + \lambda \sum_{j=0}^m g_j^2(\{\hat{r}_i\}), \quad (4)$$

где $g_j(\{\hat{r}_i\})$ – зависимости весовых коэффициентов от вектора оценок $\{\hat{r}_i\}$, $i = \overline{0, H-1}$ [14], $i = f(j, k)$, $f(\cdot)$ – функция, ставящая в соответствие паре неравных друг другу символов единственный порядковый номер, индекс l для упрощения записи здесь и далее опущен.

С учетом асимптотических свойств ОМП усредним (4) по множеству возможных значений оценок действительных частей \hat{r}_i коэффициентов межпериодной корреляции, воспользовавшись при этом линейной аппроксимацией зависимостей:

$$\hat{g}_j = g_j(\{\hat{r}_i\}) = g_j + \sum_{i=0}^{H-1} \frac{\partial g_j}{\partial r_i} (\hat{r}_i - r_i).$$

Учитывая, что H -мерный нормальный закон распределения оценок \hat{r}_i характеризуется вектором средних $\{r_i\}$ и ковариационной матрицей $\mathbf{M} = [(\hat{r}_a - r_a)(\hat{r}_b - r_b)]$, получаем:

$$\overline{\hat{g}_j \hat{g}_k} = g_j g_k + \sum_{a,b=0}^{H-1} M_{ab} \frac{\partial g_j}{\partial r_a} \frac{\partial g_k}{\partial r_b}.$$

Ковариационная матрица \mathbf{M} характеризует среднеквадратичное отклонение оценки от истинного значения параметра и находится путем обращения

соответствующей информационной матрицы Фишера \mathbf{K} [7], т. е. $\mathbf{M} = \mathbf{K}^{-1}$. Элементы матрицы \mathbf{K} определяются функцией правдоподобия $L_n(\{\hat{r}_i\})$ в виде

$$K_{ab} = -\frac{\partial^2 \ln L_n(\{\hat{r}_i\})}{\partial r_a \partial r_b} = \frac{n}{\det^2 \mathbf{r}} \left(\frac{\partial \det \mathbf{r}}{\partial r_a} \frac{\partial \det \mathbf{r}}{\partial r_b} - \det \mathbf{r} \frac{\partial^2 \det \mathbf{r}}{\partial r_a \partial r_b} \right), \quad (5)$$

где $\det \mathbf{r}$ – детерминант матрицы \mathbf{r} .

С учетом вышеизложенного усредненную величину (4) можно представить в виде:

$$\overline{\hat{\eta}_q^{-1}} = \sum_{j,k=0}^m g_j g_k r_{jk} (1 + \lambda \delta_{jk}) + \sum_{j,k=0}^m r_{jk} (1 + \lambda \delta_{jk}) \sum_{a,b=0}^{H-1} M_{ab} \frac{\partial g_j}{\partial r_a} \frac{\partial g_k}{\partial r_b}, \quad (6)$$

где δ_{jk} – символ Кронекера.

Потери, обусловленные ошибками адаптации, определяются вторым слагаемым выражения (6). Следовательно, на величину потерь наряду с неточностью оценивания коэффициентов r_i существенное влияние оказывает форма зависимости весовых коэффициентов от действительных частей коэффициентов межпериодной корреляции.

Для анализа потерь адаптации в l -м периоде повторения необходимо определить отношение $\Delta \eta_l(n)$ усредненного коэффициента подавления помехи $\overline{\eta}_l$, являющегося функцией объема обучающей выборки, к предельной эффективности подавления:

$$\Delta \eta_l(n) = \overline{\eta}_l / \lim_{n \rightarrow \infty} \overline{\eta}_l. \quad (7)$$

Потери адаптации за период вобуляции T_b определяются как суперпозиция потерь в каждом периоде повторения, входящем в ядро вобуляции. Тогда с учетом переходного процесса фильтра рассматриваемые потери можно представить в виде:

$$\Delta \eta(n) = \frac{1}{p} \sum_{l=m}^{p+m-1} \Delta \eta_l(n). \quad (8)$$

Числовые результаты анализа

На рис. 2 представлены графики, иллюстрирующие зависимость потерь эффективности АРФ с ДВК от объема обучающей выборки n для фильтров 2-го ($m=2$) и 3-го ($m=3$) порядков при нормированной ширине спектра помехи в минимальном периоде повторения $\beta = 0,05$, доплеровской фазе помехи $\psi = 0$, ядре вобуляции $p=8$, глубине вобуляции $\text{mod} = 60\%$ и отношении шум/помеха на входе фильтра $\lambda \leq 10^{-6}$. Видно, что для фильтра 2-го порядка уже при $n=3$ потери, обусловленные погрешностью оценивания вектора $\{\hat{r}_i\}$, составляют менее 1 дБ (аналогичные потери в АРФ с КВК [13] достигаются при $n=7$). Для фильтра 3-го порядка переход от комплексных весовых коэффициентов к действительным привел к сокращению объема обучающей выборки с $n=10$ до $n=6$ при уровне потерь в 1 дБ. Сокращение объема обучающей выборки обусловлено отсутствием в АРФ с ДВК полной адаптации к доплеровской фазе помехи. Рост потерь с увеличением порядка фильтра обусловлен увеличением количества H коэффициентов r_i , которые нужно оценить для адаптации к элементам матриц \mathbf{r}_l . Увеличение ширины спектра помехи приводит к росту среднеквадратичного отклонения оценки и также является причиной роста потерь.

Выражения (5)–(8) позволяют независимо от параметров вобуляции выбрать для АРФ с ДВК произвольного порядка объем обучающей выборки, исходя из допустимых потерь в предельной эффективности.

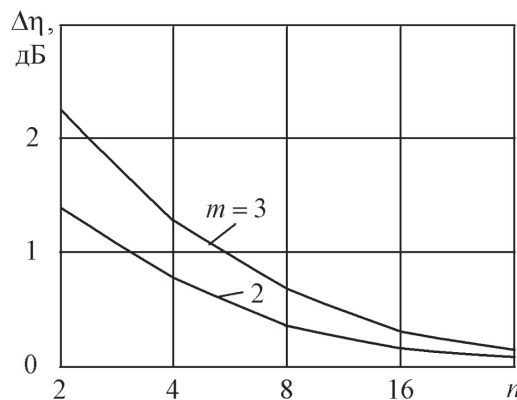


Рис. 2. Зависимости потерь от объема обучающей выборки

Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что, несмотря на проигрыш фильтру с комплексной весовой обработкой, АРФ с ДВК при априорно неизвестных параметрах помехи обеспечивает лучшую эффективность, чем известные неадаптивные алгоритмы с переменной во времени весовой обработки, а в зависимости от закона и параметров вобуляции периода повторения позволяет получить дополнительные выигрыши по сравнению с известными стационарными алгоритмами.

Выполненный на основе асимптотических свойств ОМП анализ потерь, вызванных ограниченностью объема обучающей выборки, показал, что применение в АРФ действительных весовых коэффициентов позволяет существенно сократить потери, обусловленные ошибками адаптации, и тем самым уменьшить объем обучающей выборки.

Литература

1. Skolnik, M. I. Introduction to Radar System / M.I. Skolnik. – New York : McGraw-Hill, 2001. – 862 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. Справочник по радиолокации : в 2 кн. Кн. 1 / под ред. М.И. Скольника ; пер. с англ. под ред. В.С. Вербы. – Москва : Техносфера, 2014. – 672 с.
6. Цифровая обработка сигналов в многофункциональных радиолокаторах. Методы. Алгоритмы. Аппаратура: монография / под ред. Г.В. Зайцева. – Москва : Радиотехника, 2015. – 376 с.
7. Репин, В. Г. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем / В.Г. Репин, Г.П. Тартаковский. – Москва : Советское радио, 1977. – 432 с.
8. Ширман, Я. Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – Москва : Радио и связь, 1981. – 416 с.
9. Кузьмин, С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С.З. Кузьмин. – Киев : КВиЦ, 2000. – 428 с.
10. Попов, Д. И. Адаптивная обработка радиолокационных сигналов / Д.И. Попов // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. – 2001. – № 9. – С. 98–108.
11. Попов, Д. И. Автокомпенсация доплеровской фазы многочастотных пассивных помех / Д.И. Попов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2018. – № 65. – С. 32–37.

12. Попов, Д. И. Обработка неэквилидистантных сигналов на фоне пассивных помех / Д.И. Попов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2022. – № 80. – С. 24–31.

13. Попов, Д. И. Адаптивное режектирование неэквилидистантных отсчетов пассивных помех / Д.И. Попов // Информация и Космос. – 2022. – № 2. – С. 35–40.

14. Попов, Д. И. Синтез режекторных фильтров при вобуляции периода повторения / Д.И. Попов // Информация и Космос. – 2025. – № 2. – С. 13–17.