

УДК 621.396.965:621.391.26

БЫСТРОДЕЙСТВИЕ АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ ПОМЕХ

Д. т. н. Д. И. Леховицкий, к. т. н. В. П. Рябуха, к. т. н. А. И. Дохов,
к. т. н. В. И. Зарицкий, Д. С. Рачков, А. В. Семеняка, Е. А. Катюшин

Харьковский национальный университет радиоэлектроники
Украина, г. Харьков
rvp@kture.kharkov.ua

Сравнивается быстродействие четырех разновидностей алгоритмов адаптации: корреляционных автокомпенсаторов помех, квазиньютоновских алгоритмов на основе оценок максимального правдоподобия корреляционных матриц помех и их диагонально регуляризованной разновидности, а также адаптивных решетчатых фильтров.

Ключевые слова: градиентный алгоритм адаптации, оценки максимального правдоподобия корреляционной матрицы, регуляризация, адаптивные решетчатые фильтры.

Высокое быстродействие адаптивной пространственно-временной обработки сигналов на фоне помех – необходимое условие ее эффективной работы в типичных условиях малых интервалов стационарности входных воздействий. Под мерой быстродействия будем понимать объем обучающей выборки, при котором потери эффективности (например, отношения сигнал/(помеха + шум)) исследуемого алгоритма адаптации по выбранному критерию по сравнению с гипотетической ситуацией отсутствия априорной неопределенности не превосходят допустимой величины (здесь 3 дБ).

В докладе анализируются четыре разновидности адаптивных алгоритмов и устройств. В качестве основного критерия сравнения алгоритмов и устройств используется зависимость от объема K обучающей выборки потерь в ОСПШ

$$\hat{\chi}(K) = \hat{\mu}(K)/\mu \leq 1 \quad (1)$$

анализируемого адаптивного алгоритма или устройства ($\hat{\mu}(K)$) по сравнению с его максимальным значением μ в гипотетической ситуации отсутствия априорной неопределенности.

Корреляционные автокомпенсаторы с градиентными алгоритмами настройки

Корреляционные автокомпенсаторы (АК) помех, до сих пор широко применяемые в радиолокационной технике, были предложены Я. Д. Ширманом и С. И. Красногоровым в начале 60-х годов прошлого века [1]. Примерно в то же время такие же предложения независимо появились и в США.

Один из вариантов корреляционного автокомпенсатора — «градиентный» АК работает по алгоритму

$$u_{\Sigma(k)} = y_{0(k)} + \hat{\mathbf{k}}_{k-1}^* \cdot \mathbf{y}_{comp(k)}, \quad \hat{\mathbf{k}}_k = \hat{\mathbf{k}}_{k-1} - \frac{q}{1 + q \cdot \mathbf{y}_{comp(k)}^* \cdot \mathbf{y}_{comp(k)}} \cdot \mathbf{y}_{comp(k)} \cdot u_{\Sigma(k)}^* \quad (2)$$

Здесь u_{Σ} и y_0 – комплексная амплитуда помехи, соответственно, на выходе и основном входе АК; \mathbf{y}_{comp} – вектор – столбец комплексных амплитуд помех компенсационных каналов; $\hat{\mathbf{k}}$ – формируемая с помощью цепей корреляционных обратных связей (КОС) оценка весового вектора; q – обобщенный коэффициент усиления цепей КОС АК. Индексами " k ", " $k-1$ " помечены номера шагов адаптации, Δ – элемент задержки на интервал временной дискретизации.

Как известно, быстродействие корреляционных АК, адаптирующихся по градиентному алгоритму, зависит от степени сложности помеховой обстановки (числа и расположения источников помех, их интенсивности) и может быть недопустимо большим. Так, на рис. 1 показаны зависимости

среднего значения $\overline{\chi(K)}$ потерь ОСПШ (1) от объема обучающей выборки K в цифровом корреляционном АК с градиентным алгоритмом настройки при воздействии различного числа n источников шумовых помех (ШП) с отношением помеха/шум (ОПШ) $h_0=35$ дБ в основном канале АК при четырех компенсационных каналах.

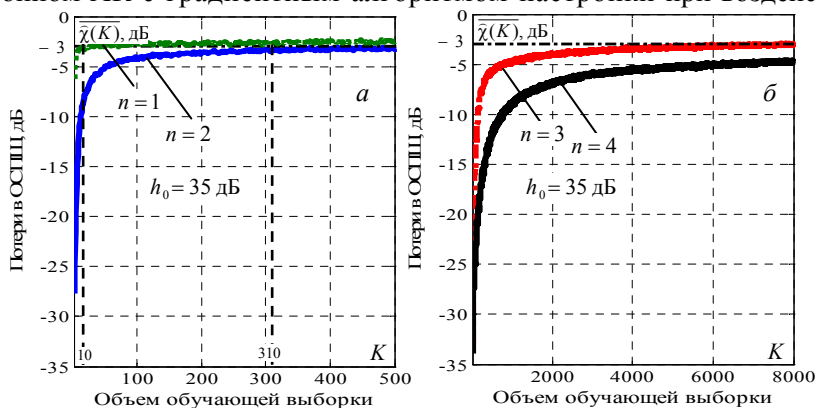


Рис. 1. Зависимости потерь в ОСПШ $\overline{\chi(K)}$ (в дБ) от объема обучающей выборки K для «градиентного» АК

Из рис. 1 видно, что при числе источников ШП $n \geq 3$ быстродействие «градиентного» АК существенно ухудшается (рис. 1, б) по сравнению с $n=1, 2$ (рис. 1, а). Например, при $n=3$ для доведения потерь до уровня 3 дБ объем выборки должен увеличиться до $K=4000$, а при $n=4$ эффективность «градиентного» АК практически не увеличивается даже при $K \geq 6000$.

Эти кривые наглядно иллюстрируют основной известный недостаток АК – зависимость его эффективности (быстродействия) от статистических характеристик входных воздействий.

Квазиньютоновские алгоритмы адаптации на основе МП оценок КМ помех

В 1974 г. I. S. Reed, I. D. Mallet и L.E. Brennan предложили новый для того времени метод адаптации, основанный на использовании в качестве оценки $\hat{\mathbf{\Pi}}$ неизвестной корреляционной матрицы (КМ) $\mathbf{\Pi}$ выборочной матрицы [2]:

$$\hat{\mathbf{\Pi}} = \{ \hat{\varphi}_{ij} \}_{i,j=1}^M = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \mathbf{y}_i \cdot \mathbf{y}_i^* \quad (3)$$

которая для комплексных нормальных обучающих векторов \mathbf{y}_i , удовлетворяющих условиям

$$\overline{\mathbf{y}_i} = 0, \quad \overline{\mathbf{y}_i \cdot \mathbf{y}_j^*} = \begin{cases} \mathbf{\Pi}, & i = j, \\ 0, & i \neq j, \quad i, j \in 1, K, \end{cases}$$

является оценкой максимального правдоподобия (МП оценкой) КМ общего вида.

Быстродействие квазиньютоновского АК, построенного на основе МП оценки КМ общего вида (3), не зависит ни от параметров (количества, интенсивности и угловых координат) источников ШП, ни от структуры антенной системы и может быть существенно выше, чем при использовании «градиентного» АК. Так, при заданном количестве M каналов обработки средний уровень потерь $\overline{\chi}$ по отношению к максимуму определяется только объемом обучающей выборки: $K \geq M$ и не превосходит 3 дБ уже при объеме выборки $K \approx 2M$ [2].

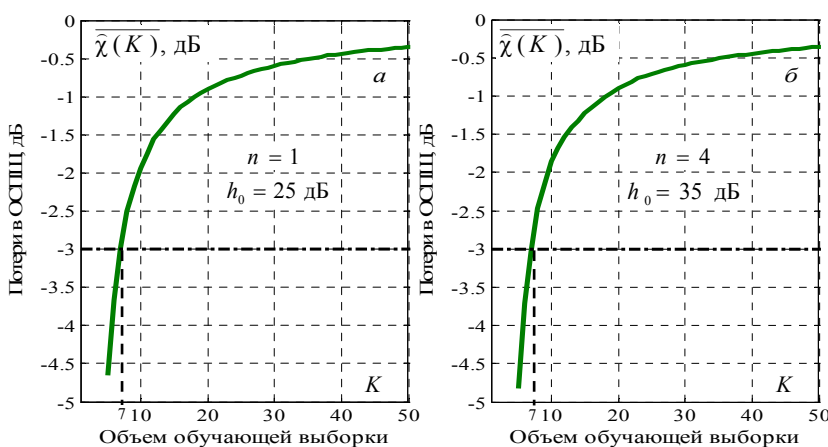


Рис. 2. Зависимости потерь в ОСПШ $\overline{\chi(K)}$ (в дБ) от объема обучающей выборки K в квазиньютоновском АК

На рис. 2 для различных помеховых ситуаций (количества источников ШП n и ОПШ h_0) показаны зависимости потерь в ОСПШ от объема обучающей выборки для АК с квазиньютоновским алгоритмом адаптации на основе МП оценки КМ общего вида (3) при четырех компенсационных каналах.

Из приведенных рисунков видно, что быстродействие рассматриваемого алгоритма адаптации остается неизменным (близким к удвоенному числу адаптивно управляемых каналов [2]) во всех рассмотренных ситуациях, отличающихся числом и интенсивностью внешних источников мешающих излучений. Тем самым устраняется основной недостаток градиентных алгоритмов адаптации.

Основной недостаток МП оценки (3) заключается в том, что адаптироваться на ее основе невозможно до тех пор, пока не будет достигнуто $K \geq M$ обучающих выборок (см. рис. 2), поскольку при $K < M$ оценочная матрица (3) вырождена. Этот недостаток отсутствует в рассматриваемом ниже квазиньютоновском алгоритме адаптации на основе диагонально регуляризованной МП оценки КМ помех.

Квазиньютоновский алгоритм адаптации на основе диагонально регуляризованной МП оценки КМ помех

В предложенном Ю.И. Абрамовичем методе диагональной регуляризации (диагонального «нагружения») [3], оценочная матрица $\hat{\mathbf{C}}$ (3) заменяется невырожденной матрицей

$$\hat{\mathbf{C}}_r = \beta_0 \cdot \mathbf{I} + \hat{\mathbf{C}}, \quad \beta_0 > 0, \quad (4)$$

положительно определенной при любых $K \geq 1$.

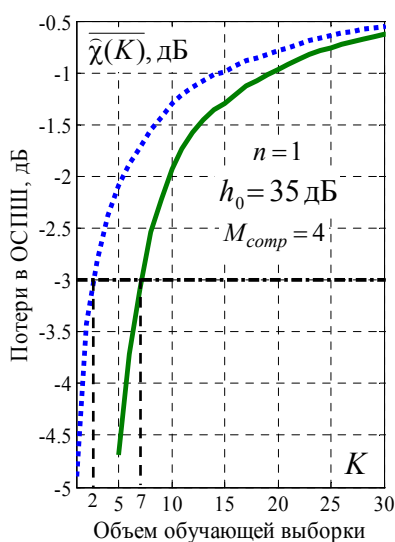


Рис. 3. Зависимости $\bar{\chi}(K)$ при использовании МП оценки КМ общего вида (4) (пунктир) и на основе (3) (сплошная линия)

При соответствующем выборе параметра регуляризации β_0 оценка (4) может существенно повысить быстродействие адаптивной обработки, поскольку вход в зону «3 дБ потерь» обеспечивается уже при объеме выборки $K=2n$. В реальных условиях часто $n \ll M$, поэтому быстродействие адаптивной обработки на основе оценки (4) существенно лучше, чем при адаптации на основе (3). В подтверждение этого на рис. 3 показаны зависимости потерь в ОСПШ от объема обучающей выборки при одном источнике ШП и четырех компенсационных каналах.

Теоретические достоинства рассмотренных квазиньютоновских алгоритмов адаптации с явным формированием матриц, обратных используемым оценкам КМ помех, могут не реализоваться на практике из-за их сильной чувствительности к точности вычислений. В реальных условиях конечной длины разрядной сетки сигнальных процессоров или программируемых логических интегральных схем их эффективность может быть заметно ниже, чем получено при вычислениях с практически неограниченной (двойной) длиной разрядной сетки в современном пакете прикладных программ MatLab.

Эти недостатки существенно ослабляются при использовании адаптивных решетчатых фильтров, имеющих, кроме того, целый ряд важных достоинств.

Адаптивные решетчатые фильтры

В адаптивных решетчатых фильтрах (АРФ) вместо явно сформированных оценочных КМ (3), (4) и матриц, обратных им, используются их так называемые мультипликативные (факторизованные) представления – в виде произведения слабозаполненных матриц различной структуры, что порождает многоступенчатую структуру этих фильтров. Здесь в качестве сомножителей факторизованных представлений используются сомножители «обобщенной факторизации Левинсона» [4].

Адаптивные решетчатые фильтры строятся из набора элементарных решетчатых фильтров – двухвходовых весовых сумматоров с перекрестными связями [4, 5].

При высокой разрядности вычислений, в частности, при практически неограниченной (двойной) разрядной сетке в пакете прикладных программ MatLab АРФ полностью эквивалентны квазиньютоновским АК с параметрами на основе МП оценки КМ общего вида (3) или ее диагонально регуляризованной разновидности (4). В этом случае АРФ с соответствующими алгоритмами настройки в точности воспроизводят приведенные для квазиньютоновских АК зависимости рис. 2, 3.

Однако при реально конечной разрядности вычислений эквивалентность АРФ и квазиньютоновских АК — в пользу АРФ. Этот эффект наглядно иллюстрируется результатами моделирования, приведенными на рис. 4, где показаны зависимости потерь в ОСПШ от объема обучающей выборки АК с адаптацией на основе обращения диагонально регуляризованной МП оценки КМ общего вида (4) (сплошная линия) и АРФ (пунктир).

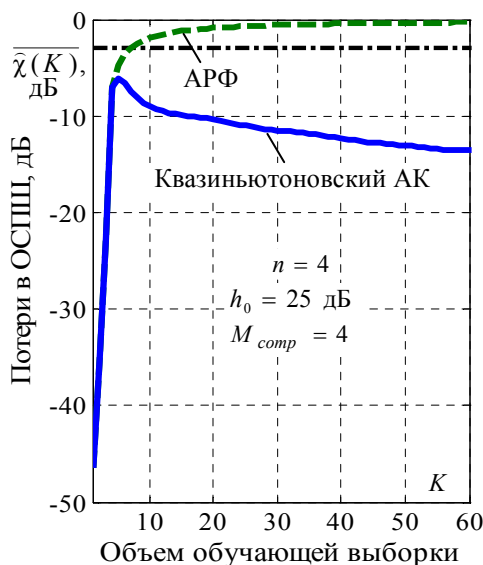


Рис. 4. Зависимости $\bar{\chi}(K)$

Видно, что в этих условиях в алгоритмах с явно формируемыми оценками КМ или матриц, обратных им, с ростом объема обучающей выборки ОСПШ может не только не увеличиваться, но даже снижаться. В АРФ этот эффект отсутствует, поэтому метод адаптивной решетчатой фильтрации оказывается существенно эффективнее теоретически эквивалентных методов, в которых оценки используемых матриц формируются явно.

Дополнительным достоинством АРФ является простота учета априорной информации различного вида о специфике структуры каналов приема и, как следствие, о специфике соответствующих КМ и использование такого учета для повышения эффективности обработки.

Таким образом, именно адаптивные решетчатые фильтры могут быть рекомендованы в качестве основы адаптивной системы обработки сигналов на фоне собственного шума излучателей и мешающих излучений внешних источников, а также системы междупериодной обработки сигналов на фоне пассивных помех, решающей задачи селекции движущихся целей.

На их основе может быть построена и система пеленгации внешних источников шумовых излучений, наиболее просто и эффективно реализующая современные известные и новые «сверхразрешающие» методы пространственного спектрального анализа.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория: Справочник / Под ред. Я. Д. Ширмана. — Москва: Радиотехника, 2007.
2. Reed I.S., Mallett J.D., Brennan L.E. Rapid Convergence Rate in Adaptive Arrays // IEEE Transactions on Aerospace Electronic System.— 1974.— Vol. AES-10.— P. 853–863.
3. Абрамович Ю.И. Регуляризованный метод адаптивной оптимизации по критерию максимума отношения сигнал/помеха // Радиотехника и электроника. — 1981. — Т. 26, №3.— С. 543–551.
4. Леховицкий Д.И. Обобщенный алгоритм Левинсона и универсальные решетчатые фильтры // Изв. Вузов. Радиофизика. — 1992. — Т. 35, № 9—10. — С. 790–808.
5. Леховицкий Д.И., Рачков Д.С., Семеняка А.В. и др. Адаптивные решетчатые фильтры Часть I. Теория решетчатых структур //Прикладная радиоэлектроника.— 2011.— Т. 10, №4.— С. 381–406.

D. I. Lekhovytskyi, V. P. Ryabukha, A. I. Dokhov, V. I. Zarytskyi, D. S. Rachkov, A. V. Semeniaka, E. A. Katiushyn

Convergence rate of algorithms for space-time adaptive signal processing against the background interference.

The authors compare the convergence rate of adaptive processors of four kinds, namely: correlation interference autocancellers, quasi-Newtonian algorithms based on both maximum-likelihood (ML) estimates of interference covariance matrices and diagonally-loaded modifications of these ML estimates, and adaptive lattice filters.

Keywords: gradient adaptation algorithm, maximum-likelihood estimate of covariance matrix, regularization, adaptive lattice filter.