

УДК 621.396.967

В.Н. Лоза<sup>1</sup>, Е.С. Ленков<sup>2</sup>, К.М. Семибаламут<sup>3</sup><sup>1</sup> Военный институт Киевского национального университета имени Т. Шевченко, Киев<sup>2</sup> Военный институт телекоммуникаций и информатизации, Киев<sup>3</sup> Военно-дипломатическая академия, Киев

## МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ ПОМЕХ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПЕРАЦИИ ПРЕДОБУСЛОВЛИВАНИЯ В СТРУКТУРЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АДАПТИВНОГО ФИЛЬТРА

Рассматривается вариант построения пространственной адаптивной системы защиты от шумовых помех типа адаптивной антенной решётки (ААР), обладающей повышенной робастностью (устойчивостью) за счёт применения в процессоре обработки проектора предобусловливания с дополнительными элементами. Проведена проверка влияния операции предобусловливания на изменение обусловленности корреляционной матрицы (КМ) помеховых сигналов. Для стандартных помеховых ситуаций выигрыш в улучшении обусловленности КМ помех после предлагаемой операции предобусловливания составляет в пределах от 2 до 18 дБ.

**Ключевые слова:** адаптивная антенная решётка, робастность, корреляционная матрица, многоканальный адаптивный фильтр.

### Введение

На этапе современного развития средств электронного противодействия и переходу к стратегии конфликтной радиоэлектронной борьбы решающее влияние начинают принимать не показатели эффективности оптимальных систем обработки, синтезированных на строго определённые статистические характеристики помех, а свойства их робастности в условиях непредсказуемой и изменяющейся модели помеховой обстановки.

Для систем пространственной адаптивной фильтрации на основе ААР динамически изменяющаяся помеховая обстановка имеет особенное влияние на характеристики установления процесса адаптации. Изменения помеховой обстановки сказываются на изменении степени обусловленности корреляционной матрицы (КМ) – главного оператора, определяющего эффективность формирования весовых коэффициентов.

По данным зарубежной печати [1] ни одно практическое применение новых методов и систем обработки радиолокационной информации не обходится без проверки этих методов на робастность.

### Основная часть

**Принцип предобусловливания при решении итерационных задач.** В теории решения систем линейных алгебраических уравнений [2] предложен метод улучшения обусловленности решающей матрицы за счёт применения предварительной операции предобусловливания.

Рассматривается метод построения системы многоканального адаптивного фильтра (МАФ) [3],

использующий данный метод, и решаются вопросы технической реализации элементов обработки.

Задача обусловливания использует принцип замены стандартного уравнения решения системы алгебраического уравнения (записывается в терминах и обозначениях линейной алгебры) [4]:

$$Ax = b \quad (1)$$

$$\text{системой} \quad M^{-1}Ax = M^{-1}b, \quad (2)$$

где  $M$  – называется предобусловливателем, а само преобразование – предобусловливанием. Матрица  $M^{-1}A$  является преобразованной матрицей.

Система (2) эквивалентна системе (1), но собственные числа полученной матрицы  $M^{-1}A$  отличаются от собственных чисел исходной матрицы (1) и имеют меньший диапазон изменения, который может быть существенно меньше при правильном выборе матрицы предобусловливателя  $M$ .

Преобразование  $M^{-1}A$  должно обладать следующими свойствами, которые определяют требования в его реализации:

(1) матрица  $M$  (как и исходная  $A$ ) должна быть симметричной и положительно определённой;

(2) матрица  $M$  должна быть близка к исходной матрице  $A$ ;

(3) вычислительная задача с матрицей  $M$  должна достаточно легко решаться.

Обоснование к выбору матрицы  $M$  и технологии решения. Выбор предполагает выполнение свойств (2) и (3), сформулированных выше.

В задачах анализа алгоритма обработки МАФ основной операцией является вычисление вектора весовых коэффициентов  $k$  решением уравнения:

$$k = B^{-1}v_c, \quad (3)$$

где  $B$  – корреляционная матрица помехи;  $v_c$  – вектор амплитудно-фазового распределения сигнала в раскрыве АР.

Таким образом, эквивалентом обобщённой формы записи уравнения (1) в решаемой задаче является:

$$Bk = v_c. \quad (4)$$

Как известно [5], корреляционная матрица помех  $B$  при квазиоптимальном алгоритме обработки в силу практической невозможности разделения сигнала и помехи вычисляется в виде оценочной КМ, определяемой выражением:

$$B_0 = n^{-1} \sum_{i=1}^n Y_i Y_i^H, \quad (5)$$

где  $Y_i$  – дискретная выборка выходных сигналов АР;  $n$  – число дискретных выборок.

С точки зрения "близости" матрицы  $M$  к исходной  $A$  согласно свойства (2) предлагается выбрать в качестве матрицы предобусловливателя матрицу, определяемую выражением (5).

В качестве технологии вычисления с использованием принципа предобусловливания предлагается программная реализация на основе решающих программных функций мощных средств компьютерной математики (СКМ) типа MATLAB [6]. Она обеспечивает компактное решение систем линейных алгебраических уравнений (4) с учётом операции (2). Программные команды [6], кроме непосредственного использования для оценки результатов, предусматривают аппаратную реализацию на базе специальных микропроцессоров типа ADVG01, ADVG01LC, ADVG12.

**Содержание вычислительной задачи с использованием СКМ [6].** Операция предобусловливания реализуется применением решающей функции следующего вида (обозначение параметров стандартное):

$$\begin{aligned} [x, \text{flaq}, \text{relres}, \text{iter}, \text{resnas}] = \\ = \text{pcg}(A, b, \text{tol}, \text{max it}, M, M, x_0), \end{aligned} \quad (6)$$

где параметры, описывающие результат:  $\text{flaq}$ ,  $\text{relres}$ ,  $\text{iter}$ ,  $\text{resnas}$  используются только при моделировании.

Основное решение системы в обозначениях решаемой задачи имеет вид:

$$k = \text{pcg}(B_0, v_c, \text{tol}, \text{max it}, M_{\text{ПДО}}, x_0), \quad (7)$$

где  $\text{tol}$  – относительная норма "невязки");  $\text{max it}$  – максимально допустимое число итераций;  $M_{\text{ПДО}}$  – матрица предобуславливания;  $x_0$  – вектор начального приближения (не обязательный).

Так как метод градиентов применяют для положительно определённых матриц, то в качестве

предобусловливателя обычно применяют неполную факторизацию Холецкого, которая реализуется функцией MATLAB  $\text{chol}$ .

Решение выполняется вычислением:

$$R = \text{chol}(B_0, \text{droptol}), \quad (8)$$

где  $\text{droptol}$  – порог разреженности (минимальное значение элементов факторизованной матрицы, он приравнивается к нулю), а обозначение  $R$  соответствует применяемому ранее  $M$ .

Нулевой порог означает, что на месте нулевых элементов исходной матрицы будут нулевые элементы матрицы факторизации, то есть число нулевых элементов не увеличивается после приближённой факторизации.

**Алгоритмическая структурная схема МАФ на основе использования процедуры предобусловливания.** Структура предлагаемого МАФ содержит дополнительные элементы, выполняющие задачи формирования матрицы предобусловливателя и решения уравнения вычисления коэффициентов с учётом операции преобразования исходной КМ. При этом эти две операции выполняются встроенными микропроцессорами, обеспечивающих программных алгоритмов, разработанных в СКМ [2]. Такое построение алгоритма не содержит вычисления обратной КМ.

Алгоритмическая структурная схема предлагаемого МАФ представлена на рис. 1.

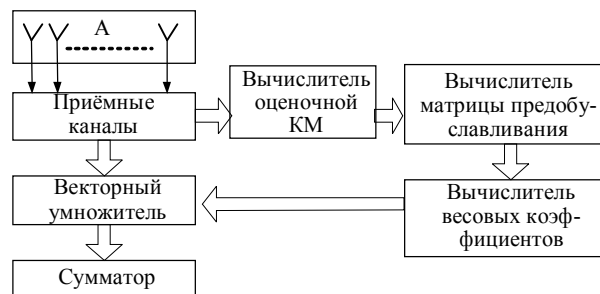


Рис. 1. Алгоритмическая структурная схема предлагаемого многоканального адаптивного фильтра

Проверка работоспособности алгоритма схемы рис. 1 на данном этапе ограничивается качественным подходом к оценке робастности. В данном случае сравниваются числа обусловленности КМ помеховых сигналов для ряда ситуаций с заданной "плохой" и "хорошей" обусловленностью исходной матрицы  $A$  (эквивалент  $B_0$ ) и преобразованной матрицы  $M^{-1}A$  (эквивалент  $M_{\text{ПДО}}$ ) согласно выражениям:

$$\eta_{B_0} = \lambda_{\text{max}} \times \lambda_{\text{min}}^{-1}, \quad \eta_{M_{\text{ПДО}}} = \lambda_{\text{max}} \times \lambda_{\text{min}}^{-1}, \quad (9)$$

где  $\eta_{B_0}$  – число обусловленности КМ  $B_0$ ;  $\eta_{M_{\text{ПДО}}}$  – число обусловленности преобразованной КМ  $M_{\text{ПДО}}$  в результате операции предобусловливания.

Для проведення перевірки впливу операції предобумовлювання на изменение обусловленности КМ помеховых сигналов проведены расчеты для следующих помеховых ситуаций:

- эквидистантная линейная антенная решетка с  $N$  дополнительными каналами и межэлементным расстоянием  $\lambda/2$  (исследованы ситуации  $N=2, N=4$ );

- количество постановщиков активных шумовых помех – 2;

- относительные мощности помех (по отношению к уровню собственных шумов каналов) равны и составляют 24,7 дБ.

Для настройки и работы блока предобумовлювания выбрана относительная норма "невязки" –  $10^{-6}$ ;

Результаты расчетов приведены на рис. 2.

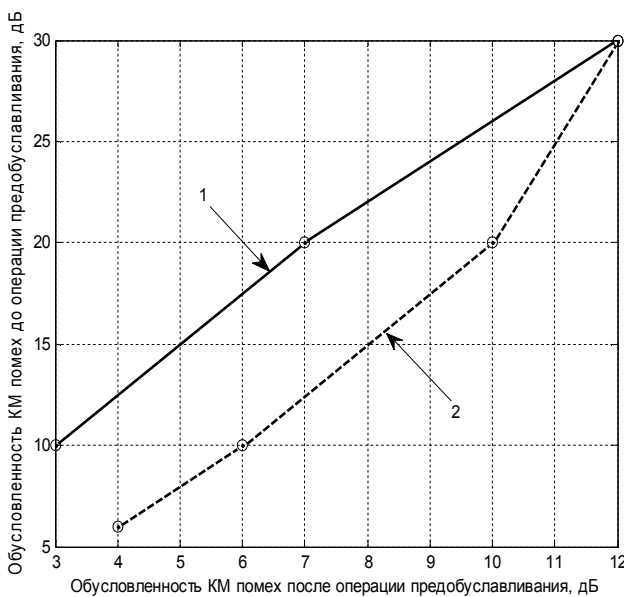


Рис. 2. Значения обусловленности КМ помех после операции предобумовлювания:  
1 –  $N=2$ ; 2 –  $N=4$

## Выводы

Анализ полученных результатов (рис. 2) позволяет сделать вывод, что для указанных помеховых ситуаций выигрыш в улучшении обусловленности КМ помех после предлагаемой операции предобумовлювания составляет в пределах от 2 до 18 дБ. Это особенно важно для ситуаций, когда исходная КМ помех характеризуется как "плохо" обусловленная. Так, при плохо обусловленной КМ (обусловленность исходной от 10 до 30 дБ) применение операции предобумовлювания позволяет получить выигрыш в обусловленности КМ в пределах от 4...7 дБ до 18 дБ. Особенно следует подчеркнуть, что применение операции предобумовлювания робастно к ситуациям с хорошей обусловленностью КМ. То есть при обусловленности исходной КМ до 10 дБ, операция предобумовлювания дает выигрыш в обусловленности КМ в пределах 3...6 дБ.

## Список литературы

1. Хьюбер Дж.П. Робастность в статистике / Дж.П. Хьюбер; пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 304 с.
2. Горбаченко В.И. Вычислительная линейная алгебра с примерами на MATLAB / В.И. Горбаченко. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 320 с.
3. Коун К.Ф.Н. Адаптивные фильтры / К.Ф.Н. Коун, П.Ф. Грант; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 392 с.
4. Хорн Р. Матричный анализ / Р. Хорн, Ч. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 655 с.
5. Мозинго Р.А. Адаптивные антенные решетки. Введение в теорию / Р.А. Мозинго, Т.У. Миллер; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.
6. Дьяконов В.П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 976 с.

Поступила в редколлегию 23.10.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.А. Можаяев, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

## МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ ВІД ПЕРЕШКОД НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ОПЕРАЦІЇ ПЕРЕДБУМОВЛЕННЯ В СТРУКТУРІ ПРОСТОРОВОГО АДАПТИВНОГО ФІЛЬТРУ

В.М. Лоза, Є.С. Ленков, К.М. Семібаламут

Розглядається варіант побудови просторової адаптивної системи захисту від шумових перешкод типу адаптивної антенної решітки (ААР), що володіє підвищеною робастністю (стійкістю) за рахунок застосування в процесорі обробки проектора предобумовлення з додатковими елементами. Проведено перевірку впливу операції предобумовлення на зміну обумовленості кореляційної матриці (КМ) перешкодних сигналів. Для стандартних перешкодних ситуацій вигоди в поліпшенні обумовленості КМ перешкод після запропонованої операції предобумовлення складає в межах від 2 до 18 дБ.

**Ключові слова:** адаптивна антенна решітка, робастність, кореляційна матриця, багатоканальний адаптивний фільтр.

## METHOD OF INCREASE OF EFFICIENCY OF ADAPTIVE SYSTEM OF PROTECTING FROM HINDRANCES ON BASIS OF THE USE OF OPERATION OF PRE-STIPULATING IN STRUCTURE OF SPATIAL ADAPTIVE FILTER

V.M. Loza, E.S. Lenkov, K.M. Semibalamut

We are considering the option of building a spatial adaptive system of protection against noise interference such as smart antenna (ADA), which has increased robustness (resistance) due to the application processor projector preconditioning with additional elements. Audited preconditioning effect of the operation to change the conditionality of the correlation matrix (BM) of interfering signals. For standard interfering win situation to improve conditioning KM interference after preconditioning the proposed transaction is in the range from 2 to 18 dB.

**Keywords:** smart antenna, robustness, correlation matrix, multi-channel adaptive filter.