

УДК 621.396.96

© В. Г. Бартенев, М. В. Бартенев, В. К. Битюков, 2015

## Коэффициент улучшения адаптивных систем селекции движущихся целей авторегрессионного типа

Проведён сравнительный анализ эффективности методов реализации адаптивных систем селекции движущихся целей на основе авторегрессионного подхода. Авторегрессионная модель коррелированных помех позволяет эффективно бороться с пассивными помехами, не прибегая к алгоритмам, основанным на обращении корреляционных матриц. Рассмотрено несколько методов формирования весовых коэффициентов адаптивных систем селекции движущихся целей, в качестве которых используются коэффициенты авторегрессии. Одним из основных параметров, определяющих эффективность сравниваемых систем, является коэффициент улучшения, который и был использован в данном исследовании.

**Ключевые слова:** селекция движущихся целей, радиолокационные станции, трансверсальный фильтр.

### Анализ коэффициентов улучшения адаптивных систем селекции движущихся целей

Адаптивные системы селекции движущихся целей (СДЦ), применяемые в обзорных радиолокационных станциях (РЛС), реализуются, как правило, в виде нерекурсивных фильтров (рис. 1), которые также называют трансверсальными (от англ. *transversal* – поперечный) или КИХ-фильтрами (фильтрами с конечной импульсной характеристикой) [1–4].

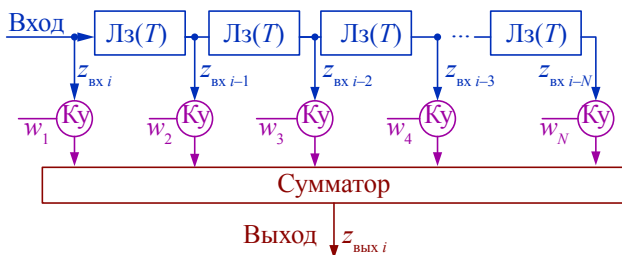


Рис. 1. Каноническая форма нерекурсивного КИХ-фильтра СДЦ

Число  $N$  является порядком трансверсального цифрового фильтра. Как видно из рис. 1, алгоритм функционирования адаптивного фильтра СДЦ сводится к взвешенному суммированию предшествующих отсчётов входного сигнала и представлен формулой:

$$z_{\text{вых } i} = w_1 z_{\text{вх } i} + w_2 z_{\text{вх } i-1} + \dots + w_N z_{\text{вх } i-N},$$

где  $z_{\text{вых } i}$  – комплексный отсчёт сигнала на выходе фильтра;

$w_i$  – комплексные весовые коэффициенты, которые могут быть представлены в виде вектора  $\mathbf{W}=(w_1, w_2, \dots, w_N)^T$ ;

$z_{\text{вх } i}$  – комплексные отсчёты сигнала на входе фильтра, которые могут быть представлены в виде вектора  $\mathbf{Z}_{\text{вх}}=(z_{\text{вх } i}, z_{\text{вх } i-1}, \dots, z_{\text{вх } i-N})^T$ .

Основными элементами фильтра служат блоки задержки Лз принятых эхосигналов за один период повторения РЛС  $T$ , а также блоки комплексного умножения Ку, выполняющие

в цифровой форме операции перемножения входной выборки эхосигналов, которые поступают с линий задержек на соответствующие весовые коэффициенты. Результаты комплексного умножения поступают в сумматор, где, складываясь, образуют отсчёт выходного отфильтрованного сигнала помехи.

Эффективность работы такого рода фильтров СДЦ во многом зависит от адаптивной настройки весовых коэффициентов. Качество фильтрации пропорционально сложности алгоритма формирования весовых коэффициентов, которые должны подстраиваться в реальном масштабе с учётом корреляционных свойств пассивной помехи в конкретной помеховой обстановке.

Параметром, характеризующим эффективность фильтра СДЦ, является коэффициент улучшения, который имеет следующее определение по *IEEE* [5]: коэффициент улучшения  $I$  системы СДЦ (*Improvement factor*) – отношение сигнал/помеха на выходе фильтра СДЦ к отношению сигнал/помеха на входе фильтра СДЦ, усреднённое равномерно по всем предполагаемым радиальным скоростям цели. Иными словами, коэффициент улучшения системы СДЦ показывает во сколько раз отношение сигнал/помеха на выходе больше, чем на входе. Скорость цели рассматривается равновероятной во всем диапазоне радиальных скоростей. Коэффициент улучшения  $I$  может быть представлен в следующем виде [6]:

$$I = \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{W} / (\mathbf{W}^T \cdot \mathbf{R}_c \cdot \mathbf{W}^*), \quad (1)$$

где  $\mathbf{R}_c$  – корреляционная матрица помехи;

$*$  – комплексное сопряжение.

Существуют различные методы формирования вектора весовых коэффициентов адаптивного фильтра, которые определяют





его эффективность и временные затраты на их формирование [7], однако до сих пор нет системно выполненной сравнительной оценки коэффициентов улучшения адаптивных систем СДЦ, в которых в качестве весовых коэффициентов используются коэффициенты авторегрессии. Проведению такой оценки уделено основное внимание.

Коэффициенты улучшения для разных методов формирования весовых коэффициентов (коэффициентов авторегрессии) были рассчитаны с использованием *MATLAB* статистическим моделированием для одинаковых параметров модели коррелированной помехи в зависимости от её первого межпериодного коэффициента со спектром гауссовой формы без доплеровского смещения, т. е.:

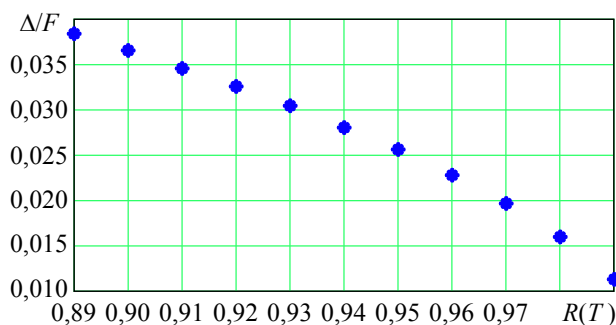
$$R(T) = \exp(-(2 \cdot 0,165 \cdot \pi \cdot \Delta \cdot T) / 2),$$

где  $R(T)$  – межпериодный коэффициент корреляции;

$T$  – период повторения РЛС;

$\Delta$  – двухсторонняя ширина спектра помехи по уровню  $-20$  дБ (что и обусловило появление в формуле множителя  $0,165$ ).

На рис. 2 представлена зависимость межпериодного коэффициента корреляции от относительной двухсторонней ширины спектра помехи  $\Delta/F$  ( $F$  – частота повторения РЛС) по уровню  $-20$  дБ. Связь этого параметра с коэффициентом корреляции важна при анализе эффективности систем СДЦ.



**Рис. 2.** График зависимости относительной ширины спектра от первого межпериодного коэффициента корреляции для гауссовой формы спектра помехи

Коэффициенты улучшения были рассчитаны для трёх систем СДЦ на основе методов оценки коэффициентов авторегрессии с использованием функций *MATLAB* [8]:

метода Берга;

модифицированного ковариационного

метода;

ковариационного метода.

В методе Берга используется функция *MATLAB arburg* (входные данные, порядок авторегрессии), которая возвращает коэффициенты авторегрессии для входных данных и задаваемого порядка модели авторегрессии. Получаемые коэффициенты авторегрессии нормируются к первому коэффициенту. Задаваемый порядок авторегрессии в виде целого числа должен быть меньше, чем длина входных данных:

$$A1 = arburg (Z, N),$$

где  $Z$  – вектор входного сигнала;

$A1$  – вектор коэффициентов авторегрессии;

$N$  – порядок авторегрессии, в расчётах равный 5.

В модифицированном ковариационном методе используется функция *armcov* (входные данные, порядок авторегрессии), которая возвращает коэффициенты авторегрессии для входных данных и задаваемого порядка, используя модифицированный ковариационный метод (функцию *modified*). Метод основан на пропускании через авторегрессионный фильтр с искомыми коэффициентами авторегрессии белого шума. Он минимизирует ошибки предсказания вперед и назад в среднеквадратическом смысле:

$$A2 = armcov (Z, N),$$

где  $Z$  – вектор входного сигнала;

$A3$  – вектор коэффициентов авторегрессии;

$N$  – порядок авторегрессии, в расчётах равный 5.

В ковариационном методе используется функция *arcov* (входные данные, порядок авторегрессии), которая возвращает коэффициенты авторегрессии для входных данных и задаваемого порядка, используя ковариационный метод (функцию *covariance*). Метод основан на пропускании через авторегрессионный фильтр с искомыми коэффициентами авторегрессии белого шума. Он минимизирует ошибки предсказания в отличие от модифицированного ковариационного метода только вперед в среднеквадратическом смысле:

$$A3 = arcov (Z, N),$$

где  $Z$  – вектор входного сигнала;

$A3$  – вектор коэффициентов авторегрессии;

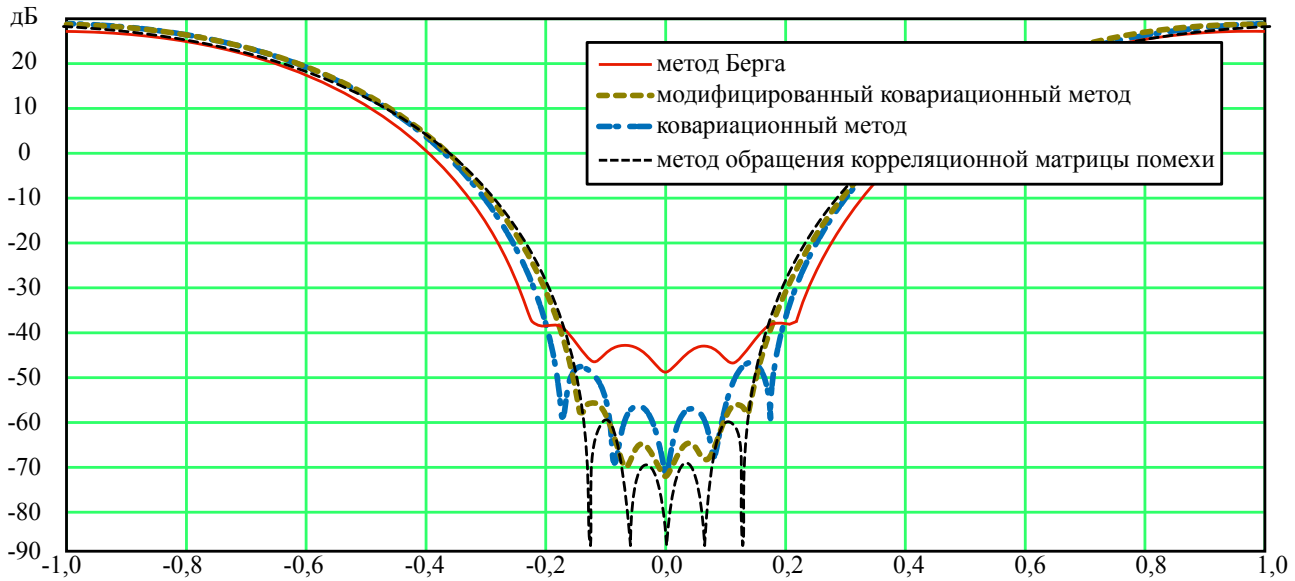


Рис. 3. Спектр сигнала на выходе адаптивного фильтра

$N$  – порядок авторегрессии, в расчётах равный 5.

Если метод Берга широко известен и его эффективность проанализирована применительно к адаптивным системам СДЦ в [6], то применение в адаптивных системах СДЦ ковариационного метода и его модификаций исследованы впервые. Известны и другие методы расчёта коэффициентов авторегрессии, например, методы Левинсона или Юла – Уокера [7], однако уже на этапе предварительного анализа их применимости в адаптивных системах СДЦ эти методы не стали рассматриваться из-за низкого получаемого коэффициента улучшения.

Расчитанные в *MATLAB* частотные характеристики фильтров СДЦ для этих трёх методов формирования весовых коэффициентов показаны на рис. 3 ( $N=5, R(T)=0,99$ ).

Для сравнения эффективности адаптивных систем СДЦ авторегрессионного типа необходимо рассмотреть и оптимальный метод формирования весовых коэффициентов адаптивной системы СДЦ. В [5] приведен оптимальный адаптивный алгоритм обработки, который требует формирования корреляционной матрицы помехи и её обращения. Процедура формирования весовых коэффициентов фильтра СДЦ требует очень высокой производительности сигнального процессора и не может быть реализована на современной элементной базе в реальном масштабе времени даже для корреляционной матрицы небольшой размерности. Тем не менее, частотная характеристика

и коэффициент улучшения оптимальной адаптивной системы СДЦ были рассчитаны. На рис. 3 также приведена частотная характеристика оптимальной адаптивной системы СДЦ ( $N=5, R(T)=0,99$ ).

Расчёт коэффициентов улучшения производился в системе *MATLAB*. При этом по изменяемому первому межпериодному коэффициенту корреляции  $R(T)$  формировалась прямоугольная корреляционная матрица, которая обращалась для формирования оптимальных весовых коэффициентов, и из которой также формировалась треугольная матрица для наложения корреляции на исходную выборку шума с гауссовым распределением. Коррелированная выборка наблюдения использовалась для нахождения усредненных коэффициентов авторегрессии всех рассматриваемых методов статистическими испытаниями. Число испытаний составляло 5000. Для верификации формирования коррелированной выборки входных сигналов помехи расчёт был произведен аналитически и моделированием коэффициента улучшения 4-кратной системы СДЦ с биномиальными весовыми коэффициентами. Результаты моделирования и аналитических расчётов полностью совпали (рис. 4).

На рис. 5 приведены коэффициенты улучшения для рассматриваемых адаптивных систем СДЦ. Выделяется своей высокой эффективностью коэффициент улучшения оптимальной системы СДЦ. Несколько хуже коэффициенты улучшения у модифицированного



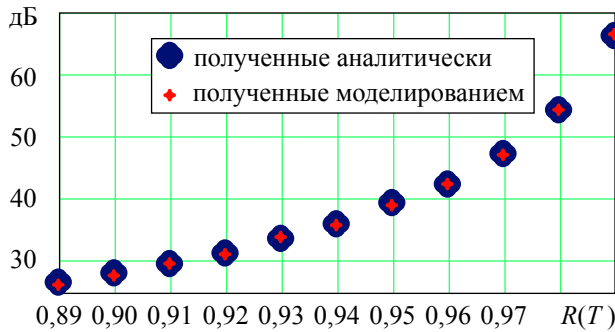


Рис. 4. Коэффициенты улучшения 4-кратной системы СДЦ с биномиальными коэффициентами

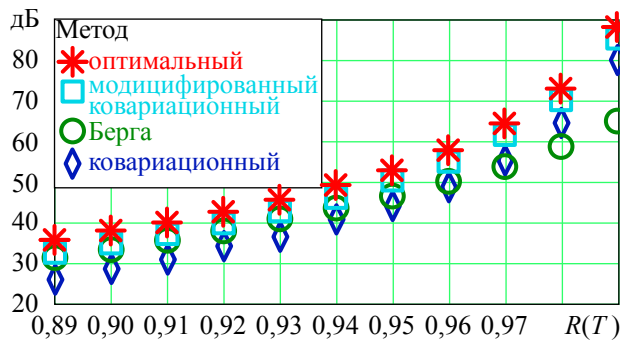


Рис. 5. Зависимость коэффициентов улучшения от межпериодного коэффициента корреляции

ковариационного метода, а метод Берга незначительно опережает по эффективности ковариационный метод для широкополосной помехи.

При расчёте коэффициентов также оценивалось время выполнения этой операции для сравнительной оценки временных затрат у разных квазиоптимальных алгоритмов с учётом усреднения коэффициентов по 32 выборкам для одного испытания. Получены следующие результаты на персональном компьютере с процессором *Intel (R) Core™ i3 CPU M330* с частотой 2,13 ГГц:

- модифицированный ковариационный метод – 0,0087 с;
- ковариационный метод – 0,0084 с;
- метод Берга – 0,024 с.

### Заключение

Из проведенных для различных вариантов оценки весовых коэффициентов адаптивной системы СДЦ расчётов следует, что наивысшим коэффициентом улучшения обладает система СДЦ с оптимальными весовыми коэффициентами на основе оценки корреляционной матрицы помехи и ее обращения. Несколько уступает ей квазиоптимальный адаптивный алгоритм на основе модифицированного ко-

вариационного метода. Метод Берга теряет в коэффициенте улучшения по сравнению с оптимальной обработкой до 10 дБ для слабо коррелированной помехи и более 20 дБ для сильно коррелированной. Ковариационный метод наоборот более эффективен для сильно коррелированной помехи, чем для слабо коррелированной помехи. По временным затратам модифицированный ковариационный алгоритм несколько уступает ковариационному алгоритму, однако его более высокая эффективность позволяет рекомендовать именно этот алгоритм для практического применения в адаптивных системах СДЦ повышенной эффективности обзорных РЛС при обработке малого числа импульсов в пачке.

### Список литературы

1. *Бартенев В. Г.* Квазиоптимальные адаптивные алгоритмы обнаружения сигналов // Современная электроника. 2011. № 2. С. 71–73.
2. *Бартенев В. Г., Битюков В. К., Симачков Д. С.* Способ адаптивной фильтрации дискретных коррелированных помех // Вестник Концерна ПВО «Алмаз – Антей». 2012. № 2. С. 48–51.
3. *Бартенев В. Г., Битюков В. К., Симачков Д. С.* Способ подавления дискретных коррелированных помех на основе нахождения координат центра окружности вектора полезного сигнала // Научноёмкие технологии. 2013. Т. 14, № 10. С. 4–10.
4. *Бакулев П. А., Степин В. М.* Методы и устройства селекции движущихся целей. М.: Радио и связь, 1986. 288 с.
5. IEEE Std 686-1997 IEEE Standard Radar Definitions. IEEE, 1997. 39 p.
6. Справочник по радиолокации / под ред. *М. И. Сколника*, пер. с англ. Кн. 1. М.: Техносфера, 2014. 1332 с.
7. *Бартенев В. Г., Кутепов В. Е.* Сравнительный анализ двух способов формирования весовых коэффициентов в адаптивной системе селекции движущихся целей // Цифровая обработка сигналов. 2014. № 2. С. 58–60.
8. *Солонина А. И., Арбузов С. М.* Цифровая обработка сигналов. Моделирование в MATLAB. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 816 с.

Поступила 14.10.15

**Бартенев Владимир Григорьевич** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры теоретической радиотехники и радиофизики ФГБОУ ВО «Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники», г. Москва.

Область научных интересов: радиолокация, цифровые методы обработки радиолокационных сигналов, программируемые сигнальные процессоры, энергосбережение.

**Бартенев Максим Владимирович** – окончил Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, выпускник очной аспирантуры, г. Москва.

Область научных интересов: радиолокация, цифровые методы обработки радиолокационных сигналов, программируемые сигнальные процессоры, энергосбережение.

**Битюков Владимир Ксенофонович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической радиотехники и радиофизики ФГБОУ ВО «Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники», г. Москва.

Область научных интересов: радиофизика, бесконтактные методы контроля теплового состояния термонагруженных блоков радиотехнических систем.

