

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ СПОСОБОВ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ В АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЕ СЕЛЕКЦИИ ДВИЖУЩИХСЯ ЦЕЛЕЙ

Кутенов В.Е., аспирант ОАО «ВНИИРТ»;

Бартенева В.Г., профессор кафедры теоретической радиотехники и радиофизики МИРЭА, д.т.н.,
e-mail: syntaltechno@mail.ru

Ключевые слова: адаптивная доплеровская фильтрация, авторегрессия, селекция движущихся целей.

Введение

Одним из самых важных этапов проектирования РЛС является разработка системы селекции движущихся целей (ССДЦ). Классическим решением задачи ССДЦ является череспериодное вычитание (ЧПВ). В ЧПВ применяются, как правило, постоянные биномиальные весовые коэффициенты и обрабатывается пачка из небольшого числа импульсов. Альтернативным вариантом ЧПВ можно считать многоканальную доплеровскую фильтрацию (МДФ) на основе алгоритма дискретного преобразования Фурье с дополнительным взвешиванием обрабатываемой пачки импульсов, например, функцией Хэмминга [1].

Недостатком ЧПВ и МДФ, имеющих фиксированные весовые коэффициенты, является недостаточная эффективность подавления эхо-сигналов пассивной помехи (ПП) со сложным многомодовым спектром, к тому же имеющим доплеровское смещение. Решить проблему подавления подобных сигналов позволяет введение в ССДЦ алгоритмов адаптивной фильтрации, то есть алгоритмов фильтрации сигнала с весовыми коэффициентами, рассчитанными в реальном масштабе времени на основе оцениваемых параметров мешающих отражений. Алгоритмы адаптивной фильтрации разработаны достаточно давно, однако в них единственными оцениваемыми параметрами при формировании весовых коэффициентов были модуль и аргумент межпериодного коэффициента корреляции [1]. В настоящее время прогресс в области методов параметрического спектрального анализа с высоким разрешением и высокопроизводительных средств цифровой обработки сигналов дали возможность подойти к реализации более совершенных алгоритмов.

Целью данной статьи является сравнительный анализ двух методов реализации адаптивной системы селекции движущихся целей на основе авторегрессионного подхода. Было рассмотрено два метода: межпериодная адаптивная фильтрация с весовыми коэффициентами в виде коэффициентов авторегрессии, оцениваемыми с использованием метода Юла-Уокера [2] и межпериодная адаптивная фильтрация с весовыми коэффициентами, оцениваемыми с использованием метода Берга [2].

Произведён сравнительный анализ двух алгоритмов адаптивной фильтрации мешающих отражений на основе авторегрессионного подхода. Показаны преимущества адаптивной системы селекции движущихся целей по сравнению с неадаптивной системой.

В качестве входных данных были выбраны две модели помехи: а) использовалась аддитивная смесь двух нефлюктуирующих отраженных сигналов мешающих отражений на частоте 0 Гц (эхо-сигнал местного предмета), на частоте 20 Гц (эхо-сигнал движущейся пассивной помехи), спектр нефлюктуирующих сигналов на входе ССДЦ показан на рис. 1). Рассматривалась флюктуирующая коррелированная помеха с гауссовой формой спектра разной ширины, корреляционные функции которой представлены на рис. 2.

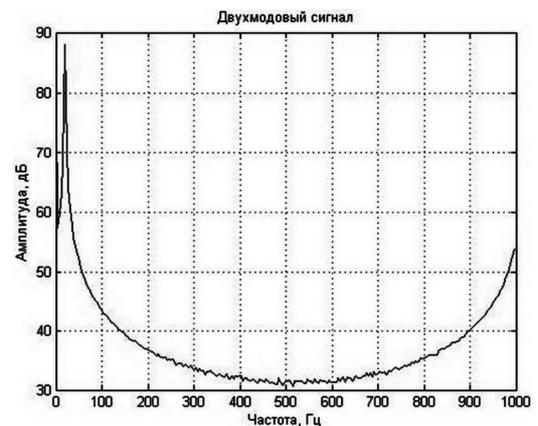


Рис. 1. Спектр сигналов на входе ССДЦ нефлюктуирующей двухмодовой помехи

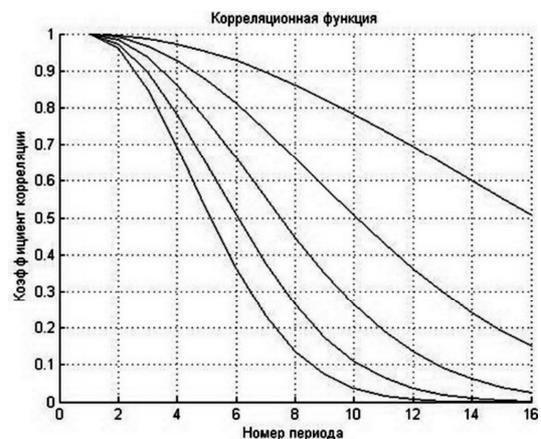


Рис. 2. Корреляционные функции флюктуирующей помехи

Адаптивная межпериодная фильтрация по алгоритму Юла-Уокера

Использование методов спектрального анализа высокого разрешения позволяет осуществлять адаптивную фильтрацию в ССДЦ каждой спектральной составляющей многомодового мешающего отражения. На рис. 3 показан спектр сигналов на выходе фильтра, полученного при обработке входного сигнала методом Юла-Уокера.

Метод оценки параметров авторегрессии Юла-Уокера заключается в решении системы уравнений:

$$\begin{bmatrix} r_{xx}[0] & r_{xx}[-1] & \dots & r_{xx}[-p] \\ r_{xx}[1] & r_{xx}[0] & \dots & r_{xx}[-p+1] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{xx}[p] & r_{xx}[p-1] & \dots & r_{xx}[0] \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ a[1] \\ \vdots \\ a[p] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_w \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

где: r_{xx} – коэффициенты автокорреляции входного сигнала; a – искомый вектор фильтра (параметры AP); ρ_w – дисперсия шума.

Для расчёта фильтра использовалась функция `aryule` системы MATLAB.

$$a = \text{aryule}(x, N-1)$$

где: x – входной сигнал; a – вектор коэффициентов фильтра; N – порядок фильтра.

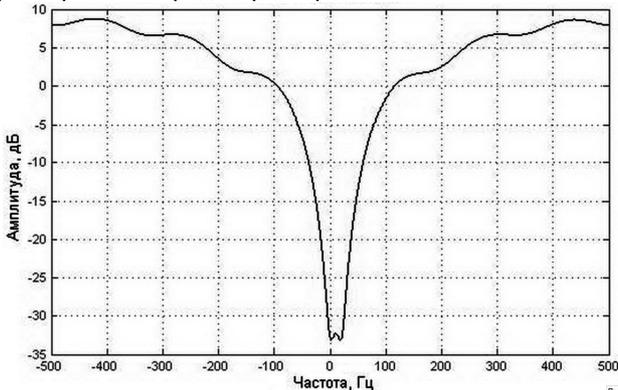


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика фильтра, рассчитанного по алгоритму Юла-Уокера

На приведённом рисунке заметно, что расположение минимумов спектра соответствует спектральным модам 0 Гц и 20 Гц.

Также из рисунка видно, что в зоне подавления у адаптивного фильтра коэффициент подавления составляет 33 дБ, что явно недостаточно для ССДЦ (обычно требуется на уровне 50-60дБ). Это обстоятельство можно причислить к недостаткам метода Юла-Уокера.

Адаптивная межпериодная фильтрация по алгоритму Берга

Метод Берга основан на минимизации ошибок линейного предсказания вперед и назад, определяемый по методу наименьших квадратов.

$$e_p^f[n] = x[n] + \sum_{k=1}^p a_p[k]x[n-k] \quad (2)$$

$$e_p^b[n] = x[n-p] + \sum_{k=1}^p a_p^*[k]x[n-p+k] \quad (3)$$

где: x – входной сигнал; a – искомый вектор фильтра (параметры AP).

При каждом значении порядка p в нем минимизируется среднее арифметическое мощности ошибок линейного предсказания вперед и назад (выборочная дисперсия ошибки предсказания):

$$\rho_p^{fb} = \frac{1}{2N} \left[\sum_{n=p+1}^N |e_p^f[n]|^2 + \sum_{n=p+1}^N |e_p^b[n]|^2 \right] \quad (4)$$

На рис. 4 показан спектр сигналов на выходе фильтра, полученного при обработке входного сигнала методом Берга. Для расчёта использовалась функция `arburg` системы MATLAB.

$$a = \text{arburg}(x, N-1)$$

где x – входной сигнал; a – вектор коэффициентов фильтра; N – порядок фильтра.

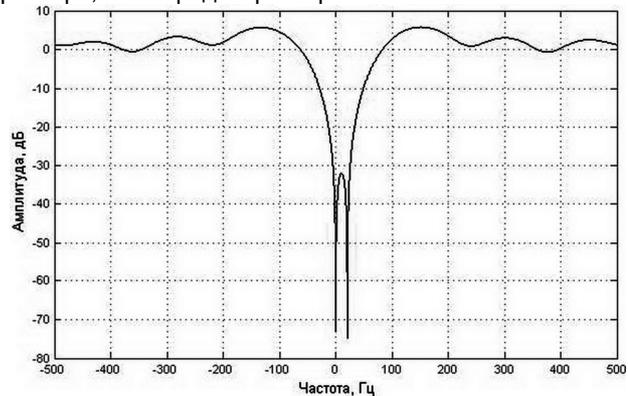


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика фильтра, рассчитанного по алгоритму Берга

Из рис. 4 видно, что метод расчета коэффициентов авторегрессии по алгоритму Берга лишён недостатков, отмеченных у метода Юла-Уокера. На рис. 4 присутствуют минимумы в районе обоих мод сигнала (0, 20 Гц). Коэффициент подавления достигает -80 дБ, что значительно больше, чем в предыдущем случае, при том, что зона подавления гораздо уже.

Подавление коррелированной помехи с разной шириной спектра флюктуаций

В предыдущих разделах рассматривалась помеха в виде двух синусоид с небольшим разносом частот. На практике может встретиться пассивная помеха, флюктуирующая от периода к периоду. Именно подавление авторегрессионными фильтрами такого типа помехи рассмотрено в данном разделе. Форма спектра флюктуаций помехи была задана гауссовой формы, а двухсторонняя ширина спектра по уровню -20 дБ изменялась от 30 до 110 Гц.

Коэффициенты улучшения у адаптивных авторегрессионных фильтров с алгоритмом Берга (кружочки) и с алгоритмом Юла-Уокера (квадратики) представлены на рис. 5. Из рис. 5 видно, что метод расчета коэффициентов авторегрессии Берга и для флюктуирующей помехи дает существенный выигрыш по сравнению с методом

Юла–Уокера. Более того этот выигрыш сохраняется и для движущейся флюктуирующей помехи. Это следует из коэффициентов улучшения для двух авторегрессионных фильтров на рис. 6. Максимум спектра флюктуаций в этом случае имел доплеровское смещение на 30 Гц.

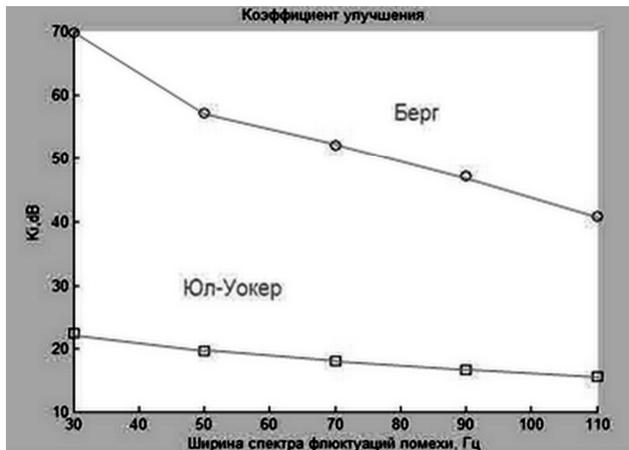


Рис. 5. Коэффициент улучшения авторегрессионных фильтров в зависимости от ширины спектра флюктуаций неподвижной коррелированной помехи

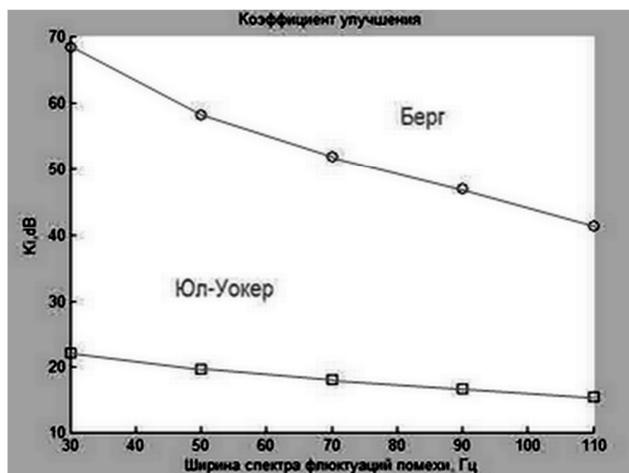


Рис. 6. Коэффициент улучшения авторегрессионных фильтров в зависимости от ширины спектра флюктуаций движущейся коррелированной помехи

Заключение

Математическое моделирование, проведенное в системе MATLAB, дало возможность сравнить два ва-

рианта реализации адаптивной системы СДЦ, основанных на авторегрессионном подходе.

Результаты моделирования показывают, что в качестве весовых коэффициентов фильтров адаптивной системы селекции движущихся целей наиболее предпочтительно использование коэффициентов авторегрессии рассчитанных методом Берга.

Данные результаты при использовании двух методов оценки коэффициентов авторегрессии с усреднением по обрабатываемой пачке импульсов можно рассматривать, как предельно возможные для нефлюктуирующих составляющих аддитивной смеси отраженных сигналов мешающих отражений, так и реально достижимые для коррелированной помехи с разной шириной спектра флюктуаций в том числе имеющей доплеровское смещение спектра.

Литература

1. Бартнев В.Г., Таныгин А.А. Радиосистемы управления РЛС. М., МИРЭА, 2010г.
2. Сергиенко А.Б. «Цифровая обработка сигналов», Учебник для ВУЗов СПб.: Питер, 2003г.
3. Bassem R. Mahafza & Atef Z. Elsherbeni «MATLAB simulations for radar systems design» Chapman & Hall/CRC Press LLC, 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431, 2004
4. Gaspare Galati. «Advanced radar techniques and systems» Peter Peregrinus Ltd., on behalf of Institution of Electrical Engineers, London, UK, 1993.
5. Vyacheslav Tuzlukov «Signal processing in radar systems» Talor & Francis Group LLC/CRC Press LLC, 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431, 2013.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE TWO AUTOREGRESSIVE METHODS IN COMPUTING WEIGHTING COEFFICIENTS FOR THE ADAPTIVE MTI

Bartenev V.G., Kutepov V.E.

The report devoted to the comparative analysis of the two autoregressive methods in computing weighting coefficients for the adaptive MTI. It was shown, using MATLAB algorithms, that Burg's autoregressive approach more effective than Yule-Worker method. In addition, adaptive MTI was compared with non-adaptive MTI. Advantages of adaptive MTI approach was demonstrated.