

# Метод траекторной обработки радиолокационной информации с использованием масштабно-временного подхода

С. Э. Грехов, Д. А. Бескин, А. О. Ушаков

ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»

vunc-vmf-vmii@mil.ru

**Аннотация.** В данном докладе представлено техническое решение, основанное на масштабно-временном подходе в интересах решения задач траекторной обработки радиолокационной информации. В качестве масштабно-временного преобразования предлагается использовать вейвлет-преобразование, в основу которого положен вейвлет Хаара. Простота его реализации приводит к снижению вычислительных затрат и ошибки прогнозирования. Оценка эффективности произведена на основе математического моделирования, а её результаты подтверждают актуальность темы доклада.

**Ключевые слова:** траекторная обработка, вейвлет-преобразование, вейвлет Хаара, масштабно-временное преобразование

Оценка параметров траектории движения объекта с разными скоростями является одной из главных задач вторичной обработки радиолокационной информации. Для этого необходимо реализовать алгоритмы, направленные на решение задач сопровождения маневрирующих объектов локации по отдельности. Данные алгоритмы позволяют оценить и экстраполировать координаты цели и их производные [1].

Наличие сложной сигнально-помеховой обстановки и искажений, вызванных движением объекта, влияет на качество обнаружения и сопровождения целей. Исходя из этого, к радиолокационным средствам предъявляются высокие требования к точности определения координат, скорости и параметров движения объекта.

Для решения поставленной задачи необходимо привлечь масштабно-временной и теоретико-групповой подходы, которые используются для реализации программных средств [2–5] и у которых группы преобразований времени определяются неприводимыми представлениями в пространстве функций:

$$S(f) \xrightarrow{g} \frac{1}{\sqrt{\alpha}} S\left(\frac{f}{\alpha}\right) \exp(\mp i 2\pi f t). \quad (1)$$

где  $S(f)$  – спектр сигнала.

Важно подчеркнуть, что в теории масштабно-временных представлений сигналов вместо частотно-

временной плоскости  $(t, f)$  вводят масштабно-временную плоскость  $(\Delta, t)$ ,  $0 \leq \Delta < \infty$ ,  $-\infty < t < \infty$ . При этом параметр  $\Delta > 0$  называется параметром масштаба и отвечает за растяжение вейвлет-функции. При условии, когда  $\Delta$  меняет свои значения, меняется и масштаб импульсной характеристики оператора. При этом малому масштабирующему параметру  $\Delta$  соответствуют высокие частоты, и наоборот. Изменение параметра задержки  $t$  смещает центр временной локализации представления сигнала в масштабно-временной плоскости. В результате этих преобразований представление сигнала в масштабно-временной плоскости дает возможность изучать явления с коротким временем интегрирования, как, например, области сингулярности в сигнале.

Одной из главных причин использования масштабно-временного подхода к анализу радиолокационной информации является возможность получения масштабно-временного прогноза с хорошими свойствами локализации по обоим переменным. Таким образом данное представление обеспечивает лучшую частотно-временную локализацию сигналов, гибкость и возможность выбора более подходящего вида импульсной характеристики.

Масштабно-временное представление сигналов позволяет выявить не только осцилляции с хорошо фиксированным периодом, но и нестационарные осцилляции, локализованные периодичностью. Энергия (или дисперсия) масштабных коэффициентов пропорциональна дисперсии анализируемых данных, что дает распределение энергии процесса по масштабам. Возможность получения этой характеристики локально позволяет при анализе сигналов получить набор характерных масштабов и объективно определить масштабы, связанные с когерентными структурами анализируемого процесса.

По значениям коэффициентов, а также по значениям локальных экстремумов можно вычислить размерность анализируемого множества. Фильтрационные, прогнозирующие и реконструкционные свойства преобразования позволяют оперировать информацией (сглаживание, разложение на компоненты, свертка и т. п.) без потери значимых деталей. Разрывы

непрерывности, скачки и другие особенности, возникающие из-за вариаций измеряемой характеристики и сбоев или шума инструментов измерения, легко детектируются, локализуются и при необходимости могут быть устранены или скорректированы.

В дальнейшем за основу вейвлет-преобразования взят вейвлет Хаара, импульсные характеристики которого имеют вид:

$$g_n = 1, -1, (n = 0,1) \text{ и } h_n = 1,1, (n = 0,1). \quad (2)$$

Вейвлет Хаара является предпочтительным с точки зрения быстродействия и объема памяти при реализации быстрых алгоритмов, позволяющий проводить вычисления при помощи элементарных операций сложения и вычитания:

$$D_{n,m}^{j+1} = S_{2n+1,2m+1} + S_{2n+1,2m} - S_{2n,2m+1} + S_{2n,2m}, \quad (3)$$

где  $D_{n,m}^{j+1}$  – вейвлет-коэффициенты, соответствующие горизонтальному и вертикальному направлениям, для  $j$ -го масштаба;

$j = 0, \dots, \log_2 N - 1$  – количество масштабов,  $n = 0, \dots, \frac{N}{2^{j+1}} - 1$ ;  $m = 0, \dots, \frac{N}{2^{j+1}} - 1$  – количество строк и столбцов результирующей матрицы вейвлет-коэффициентов для  $j$ -го масштаба.

Он может быть реализован с помощью  $\log_2 N$ -этапов проведения стандартных процедур, не требующих операций умножения, а только операций сложения и вычитания причем одновременно по строкам и столбцам, в то время как классический алгоритм вейвлет-преобразования требует  $4 \log_2 N$ -этапов операций нестандартного матричного умножения, на каждом из которых выполняется от 4 до  $4NL$  операций умножения, конкретное количество которых зависит от длины импульсной характеристики  $L$  выбранного вейвлета.

После выполнения алгоритма масштабного-временного преобразования выполняется операция линейного прогнозирования ( $PREDICT(\Delta, t, p)$ ), представленная ниже [2, 3]:

$$s(t) + n(t) \xrightarrow{g} S(\Delta, t) \xrightarrow{PREDICT(\Delta, t, p)} Prg(\Delta, t) \xrightarrow{g^{-1}} ss(t), \quad (4)$$

где  $s(t)$  – временной процесс;  $n(t)$  – преднамеренная помеха;  $PREDICT(\Delta, t, p)$  – функция прогнозирования;

$Prg(\Delta, t)$  – результат масштабного-временного прогнозирования;  $ss(t)$  – результат прогноза.

Для оценки эффективности предложенного технического решения, описанного выражениями (1 – 4) было проведено математическое моделирование (рис. 1, рис. 2).

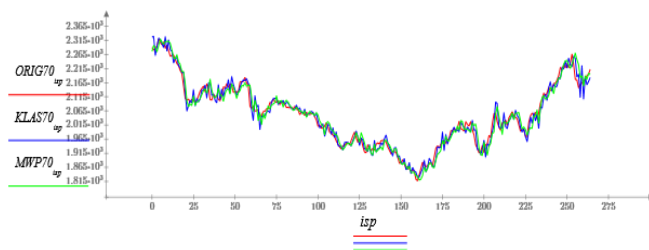


Рис. 1. Графическое представление результатов прогнозирования на 1 шаг вперед: красный реальные данные, синий стандартный метод, зеленый масштабного-временной

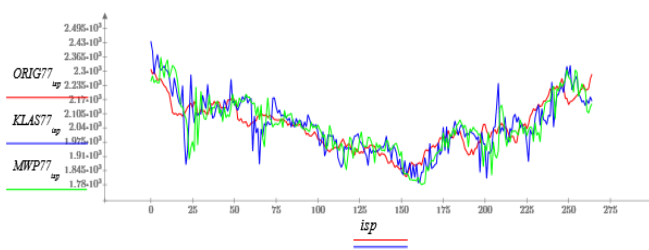


Рис. 2. Графическое представление результатов прогнозирования на 8 шагов вперед: красный реальные данные, синий стандартный метод, зеленый масштабного-временной

На рисунках выше, красным цветом обозначено прогнозирование марковского процесса, синим цветом – классическое прогнозирование, зеленым цветом масштабного-временное прогнозирование [4, 6]. В качестве критериев эффективности были выбраны ошибки прогнозирования, коэффициент корреляции в условиях влияния преднамеренной помехи [7]. Сравнительный анализ полученных результатов проведен с помощью [8].

Из анализа рис. 1 и рис. 2 видно, что точность прогнозирования напрямую зависит от ее глубины.

Рис. 3 отражает осредненные оценки математических ожиданий коэффициентов корреляции и ошибок масштабного-временного прогнозирования в зависимости от глубины прогнозирования и уровня преднамеренных помех.

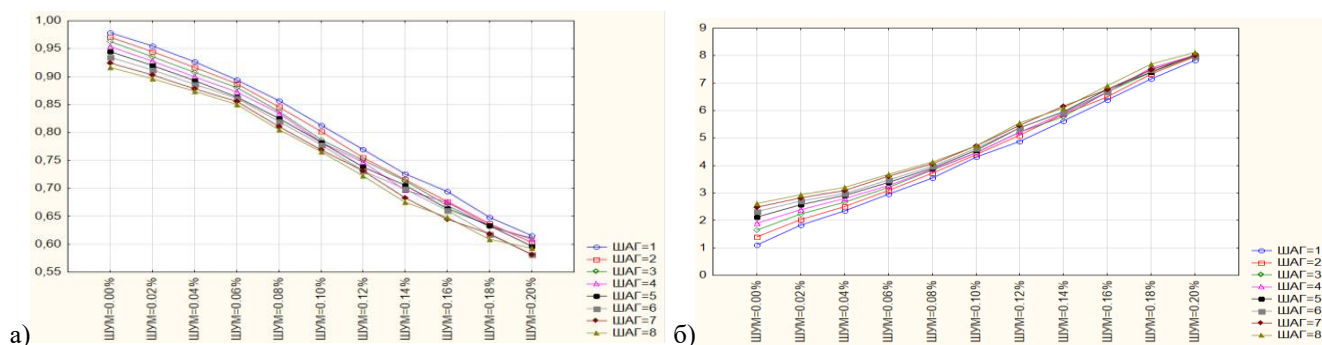


Рис. 3. Зависимость осредненной оценки математического ожидания: а) коэффициента корреляции результата масштабно-временного прогнозирования от уровня преднамеренных помех при заданном шаге; б) ошибки масштабно-временного прогнозирования от уровня преднамеренных помех при заданном шаге

Рис. 4 отражает сравнительные значения осредненной оценки математического ожидания коэффициента корреляции и ошибки масштабно-временного

прогнозирования к линейному в зависимости от глубины прогнозирования и уровня преднамеренных помех.

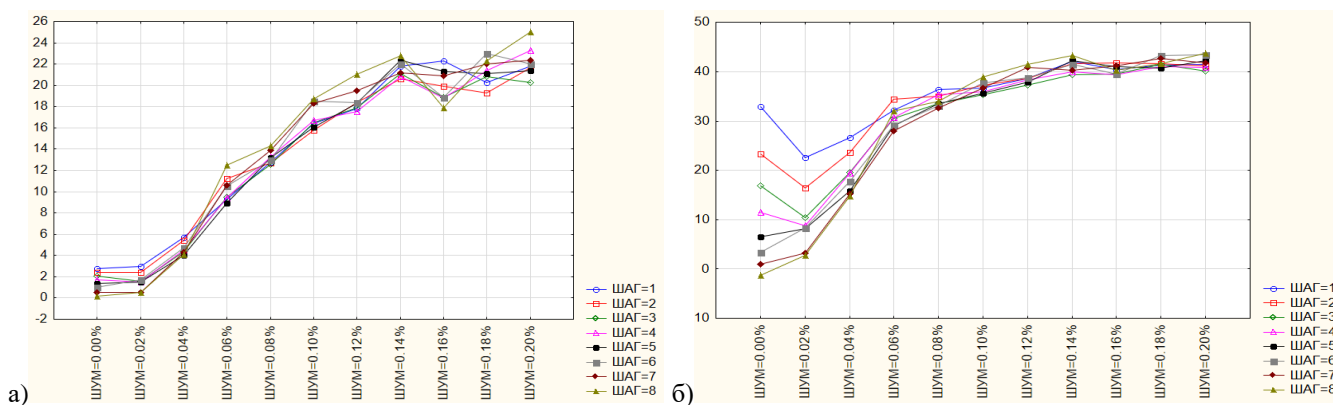


Рис. 4. Зависимости отношений осредненных оценок математического ожидания: а) коэффициента корреляции масштабно-временного метода к линейному; б) ошибки прогнозирования масштабно-временного метода к линейному

Из анализа рис. 3 и рис. 4 видно, что метод масштабно-временного прогнозирования чувствителен не только к глубине прогнозирования, но и к уровню преднамеренной помехи. Рост уровня помех приводит к снижению коэффициента корреляции и росту ошибки прогнозирования. Рост скользящей средней приводит к запаздыванию, что влечет за собой незначительное ухудшению прогноза.

В заключение стоит отметить, что использование метода траекторной обработки радиолокационной информации, основанного на масштабно-временном подходе, позволяет увеличить коэффициент корреляции до 25 % и сократить ошибку прогнозирования до 40 %. Предложенное техническое решение позволит снизить вероятность срыва сопровождения маневрирующих целей, движущихся с разными скоростями, что приводит к повышению эффективности функционирования радиотехнических средств в целом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Голенко Д.С. Сопровождение маневрирующих источников сигналов, двигающихся по баллистическим траекториям. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М. 2020 г.  
 [2] Бескин Д.А., Доценко С.М., Магон А.Е., Титков И.В. Программа формирования решения при масштабно-временном

прогнозировании временного ряда. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2019610213 от 09.01.2019 года.

[3] Бескин Д.А. К вопросу прогнозирования временных рядов сигнала. XX Межвузовская НТК «Военная радиоэлектроника: Опыт использования и проблемы, подготовка специалистов», ВМИРЭ. ч.2. Петродворец, 2009, с.137-144.  
 [4] Бескин Д.А. К вопросу прогнозирования временных рядов сигнала. XX Межвузовская НТК «Военная радиоэлектроника: Опыт использования и проблемы, подготовка специалистов», ВМИРЭ. ч.2. Петродворец, 2009, с.137-144.  
 [5] Бескин Д.А., Грехов С.Э. Программа масштабно-временного прогнозирования траектории движения объекта. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №20222681071 от 09.11.2022 г.  
 [6] Галустов Г.Г. Математическое моделирование и прогнозирование в технических системах: учеб. пособие / Г.Г. Галустов, С.П. Бровченко, С.Н. Мелешкин. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. 30 с.  
 [7] Чучева И.А. Модель прогнозирования временных рядов по выборке максимального подобия: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Московский государственный технический университет им. Н.Э. Бауман. Москва, 2012. 155 с.  
 [8] Щербаков М.В., Бребельс А., Щербакова Н.Л., Тюков А.П. Обзор оценок качества моделей прогнозирования // Интернет конференция по проблемам теории и практики управления – [Электронный ресурс]. – Режим доступа. [В Интернете] [http://ubs.mtas.ru/bitrix/components/bitrix/forum.interface/show\\_file.php?fid=6450](http://ubs.mtas.ru/bitrix/components/bitrix/forum.interface/show_file.php?fid=6450).