

На правах рукописи

Мазуров Кирилл Андреевич

Многоsegmentный метод обработки квазинеprерывных сигналов
когерентных РЛС

05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) на кафедре радиотехнических систем

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор

Кутузов Владимир Михайлович

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор, Быстров Николай Егорович, заведующий кафедрой радиосистем Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого (г. Великий Новгород)

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Регинский Владимир Дмитриевич, ведущий научный сотрудник НИЦ РЭВ и ФИР ВМФ НИИ оперативно-стратегических исследований строительства ВМФ ВУНЦ ВМФ «ВМА им. Адмирала флота Н.Г. Кузнецова» (г. Пушкин)

Ведущая организация – ОАО «Концерн «Гранит-Электрон»

Защита состоится 12 декабря 2012 года в ___ на заседании диссертационного совета Д 212.238.03 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Автореферат разослан ___ ноября 2012 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Баруздин С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Тактико-технические характеристики современных РЛС во многом определяются используемым зондирующим сигналом (ЗС) и алгоритмом его обработки. Выбор и обоснование структуры ЗС является сложной задачей поиска компромисса между большим количеством противоречивых требований. Например, обеспечение однозначности измерений в больших диапазонах дальностей и радиальных скоростей требует применения сложномодулированных сигналов с большой базой, обеспечивающих возможность получения сигнала с низким уровнем боковых лепестков (БЛ) функции неопределенности (ФН). В то же время, необходимость работы РЛС на одну приемно-передающую антенну не позволяет применять непрерывные ЗС с большой базой. Использование квазинепрерывного режима работы за счет ортогональной коммутации приемника и передатчика РЛС специальным сигналом развязки приводит к трансформации принимаемых отраженных сигналов и, соответственно, к изменениям их ФН.

Сопутствующие квазинепрерывному режиму работы РЛС возрастающие БЛ ФН на частотах, кратных основной частоте повторения сигнала развязки, являются трудноустраняемыми, что фактически ограничивает рабочую зону РЛС по допустимому значению радиальных скоростей обнаруживаемых целей. Цели, радиальная скорость которых приводит к доплеровскому сдвигу частоты отраженного сигнала, превышающему основную частоту повторения сигнала развязки, рассматриваются как скоростные, обнаружение и оценка параметров которых на фоне помех представляет собой сложную научно-техническую задачу.

Целью работы является расширение границ рабочей зоны РЛС по допустимому значению радиальных скоростей обнаруживаемых целей при использовании сложномодулированных квазинепрерывных (СКН) ЗС, для чего рассматривается возможность применения многосегментного авторегрессионного (АР) алгоритма обработки, обладающего высокой разрешающей способностью и помехоустойчивостью.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие задачи:

1. Анализ модельно-параметрических методов спектрального оценивания и обоснование выбора АР алгоритма обработки СКН сигналов для обнаружения и измерения параметров движения скоростных целей и обеспечения высокой разрешающей способности по частоте.
2. Выбор и обоснование рабочих статистик АР алгоритма для решения задач обнаружения и оценивания параметров отраженных сигналов на фоне помех.

3. Разработка компьютерной модели, позволяющей количественно оценить и провести с требуемой достоверностью сравнение показателей качества исследуемого алгоритма с известными алгоритмами корреляционной обработки сигналов с доплеровским спектральным анализом на основе преобразования Фурье.
4. Исследование показателей качества разработанного многосегментного AP алгоритма обработки сложных квазинепрерывных сигналов: характеристик обнаружения (ХО), помехоустойчивости (ХП), разрешения-обнаружения (ХРО), точности (ХТ), разрешения-измерения (ХРИ).
5. Оценка вычислительных затрат, необходимых для аппаратной реализации алгоритма в реальном времени.

Методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач были использованы теория сигналов, теория вероятности, статистическая теория радиотехнических систем, методы спектрального анализа, математической статистики, на которых базируются построенные компьютерные и математические модели, что обуславливает их достоверность и обоснованность полученных результатов.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1. Получены ХО многосегментного AP алгоритма обработки для сигналов с детерминированной и флюктуирующей амплитудами и равномерно распределенной случайной начальной фазой, позволяющие оценить потери в отношении сигнал-шум (ОСШ) по сравнению с согласованной обработкой и определить параметры AP обнаружителя, при которых его можно считать квазиоптимальным.
2. Получены ХРО и ХП к сигналподобным помехам для многосегментного AP алгоритма, подтверждающие высокие помехоустойчивость и разрешающую способность, в том числе, в пределах главного лепестка ФН, при обнаружении сигналов, отраженных от скоростных целей.
3. Показано, что узкополосные помехи (с шириной полосы, характерной для отраженных от взволнованной морской поверхности сигналов) воспринимаются многосегментным AP алгоритмом как сосредоточенные по спектру, что позволяет использовать при анализе их воздействия ХП, полученные для сосредоточенных сигналподобных помех.
4. Выполнен анализ влияния порядка AP модели и числа сегментов на показатели качества многосегментного AP алгоритма при различных длинах анализируемого сигнала, позволяющий осуществлять обоснованный выбор параметров модели и сигнала в задачах обнаружения, оценивания параметров и разрешения сигналов.

5. Получено аналитическое выражение для асимптотического предела дисперсии оценки частоты для многосегментного AP алгоритма, показывающее, что переход к многосегментной обработке снижает потенциальную точность оценки частотных параметров по сравнению с исходным AP алгоритмом.
6. Получены зависимости дисперсии и смещения оценки частоты от частотной расстройки при разрешении двух равномошных сигналов, позволяющие определить границу области аномальных ошибок в задачах разрешения-измерения сигналов в пределах главного лепестка ФН.

Положения, выносимые на защиту.

1. Многосегментный AP алгоритм обработки сигналов позволяет обнаруживать скоростные цели в диапазоне доплеровских сдвигов частоты сигнала $f_D \in [0; 1/\tau_n]$, где τ_n – длительность чипа ЗС, за счет устранения неоднозначности измерения скорости цели, обусловленной наличием БЛ ФН сигнала на частотах, кратных основной частоте повторения сигнала развязки, обеспечивающего работу приемника и передатчика РЛС на одну антенну.
2. Построенные ХО многосегментного AP алгоритма для медленных и быстрых целей позволяют определить параметры модели и сигнала, при которых алгоритм является квазиоптимальным по сравнению с оптимальным обнаружителем.
3. Разработанный многосегментный AP алгоритм при использовании нормированной статистики обнаружения для выбранного типа сигнала с псевдослучайной структурой фазового кода не чувствителен к помехам, поступающим от соседних дальномерных каналов, что позволяет обнаруживать малоразмерные цели на фоне мощных мешающих отражений от подстилающей поверхности.
4. Асимптотический предел дисперсии оценки частоты многосегментного AP алгоритма зависит от количества сегментов анализируемого сигнала. Требуемое для обеспечения заданной точности оценки частоты ОСШ увеличивается пропорционально количеству сегментов.

Практическая ценность работы. В работе показано, что многосегментный AP алгоритм обработки сигналов может рассматриваться как самостоятельный алгоритм совместного обнаружения и оценивания частотных параметров сигналов, отраженных от скоростных целей. Оценены вычислительные затраты, необходимые для реализации алгоритма в режиме реального времени для РЛС с параллельным обзором по дальности и последовательным обзором по азимуту. Разработанные модели позволяют исследовать показатели качества алгоритма для различных длин анализируемых выборок, разных порядков и интенсивностей воздействующих на РЛС помех.

Показана высокая помехоустойчивость многосегментного AP алгоритма к воздействию сигналоподобных помех.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на V международном конгрессе «Цели развития тысячелетия и инновационные принципы устойчивого развития Арктических регионов» (Санкт-Петербург, 2012).

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 5 работ. Из них 4 работы опубликованы в центральных рецензируемых научных журналах, рекомендованных перечнем ВАК, 1 работа содержится в сборнике материалов международной конференции.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка, двух приложений. Она изложена на 155 страницах машинописного текста, содержит 56 рисунков, библиографический список включает 64 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы и основные решаемые задачи. Также введение содержит краткое содержание основных разделов работы.

В первой главе формулируются требования к ЗС современных когерентных РЛС, подчеркивается противоречивость многих из них и необходимость принятия компромиссных решений при выборе ЗС. В частности, необходимость работы РЛС на одну приемо-передающую антенну не позволяет применять непрерывные сигналы с большой базой. Использование квазинепрерывного режима работы за счет инверсной коммутации приемника и передатчика РЛС специальным сигналом развязки приводит к трансформации принимаемых отраженных сигналов и, соответственно, к изменениям их ФН. Дан краткий обзор существующих методов разрешения этих противоречий, прежде всего касающихся снижения уровня боковых лепестков (УБЛ) ФН ЗС в рабочей зоне по дальности и радиальной скорости. В качестве альтернативы предлагается рассмотреть возможность применения в задачах обработки сигналов, отраженных от скоростных и маневрирующих целей, многосегментных модельно-параметрических алгоритмов обработки сигналов.

Далее конкретизируется понятие «скоростной цели» в приложении к первичной обработке радиолокационных сигналов. В качестве критерия отнесения цели к «скоростной» выбрано превышение доплеровским сдвигом частоты отраженного от

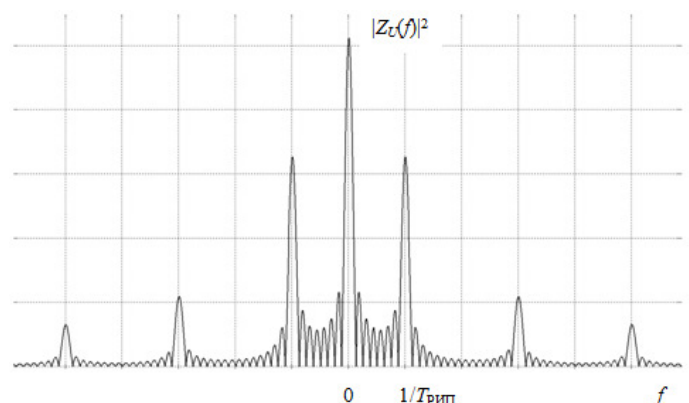


Рис. 1 – Типовой спектр ЗС на основе РИП.

цели сигнала величины, обратно пропорциональной периоду сигнала развязки РЛС. На рис. 1 представлен типовой спектр ЗС, использующего в качестве сигнала развязки регулярную импульсную последовательность (РИП) со скважностью импульсов $Q=2$ и периодом $T_{\text{рип}}$. Условно чистая зона с относительно низким уровнем фоновых БЛ такого сигнала ограничена по частоте величиной $1/T_{\text{рип}}$, которой соответствует первый БЛ высокого уровня.

В заключительной части первой главы обсуждаются проблемы, возникающие при приеме и обработке СКН сигналов, отраженных от скоростных и маневрирующих целей, а также преимущества и недостатки существующих методов их решения.

Во второй главе приведен обзор модельно-параметрических алгоритмов, обладающих свойством высокого разрешения, а также обосновывается выбор АР алгоритма с нахождением АР коэффициентов методом Берга в качестве перспективного алгоритма обработки сигналов и объекта дальнейших исследований. Алгоритм Берга предполагает получение АР коэффициентов высших порядков рекуррентным методом, на основе АР коэффициентов, полученных для моделей низших порядков. К его достоинствам относятся: простота реализации, возможность получения АР параметров для всех порядков модели от первого до максимального, гарантированная устойчивость синтезируемых моделей. Для выбранного алгоритма спектральной обработки сигналов приведены и обоснованы рабочие статистики обнаружения и оценивания, в том числе, обладающие свойством стабилизации вероятности ложных тревог (ВЛТ). Одним из эквивалентных способов задания АР модели является определение комплексных полюсов, несущих в себе информацию о сигнальных составляющих анализируемой выборки. Аргументы полюсов используются для оценивания частот сигнальных компонент, что позволяет вычислять оценку спектральной плотности мощности (СПМ) в точках, соответствующих этим аргументам, и на основе сравнения с порогом принимать решение о наличии либо отсутствии сигнала.

Далее кратко изложен принцип работы когерентной РЛС с квазинепрерывным режимом излучения и конкретизирована структура рассматриваемого ЗС. Для компьютерного моделирования в качестве тестового выбран СКН ЗС вида РИП с внутриимпульсной бинарной фазовой манипуляцией на $(0, \pi)$, состоящий из 8 импульсов по 32 элемента в каждом. В качестве внутриимпульсной фазоманипулирующей (ФМ) последовательности выбрана последовательность максимальной длины (М-ПСП), нашедшая сегодня широкое применение в действующих серийных РЛС. Использовано сквозное заполнение импульсов РИП элементами М-ПСП длиной $M = 255$, что обеспечивает изменение структуры ФМ кода от импульса к импульсу. Выбор структуры и параметров тестового сигнала обусловлен необходимостью исследования влияния БЛ ФН на качество работы многосегментного АР алгоритма.

В заключительной части второй главы приводятся структурные схемы устройств обработки сигналов на основе исследуемых алгоритмов обработки и структуры решетчатых фильтров для расчета АР коэффициентов при несегментированной и многосегментной обработке, основой которых является минимизация суммарной ошибки предсказания при подгонке АР модели к реальному сигналу. Для несегментированного АР алгоритма расчет коэффициентов АР модели, по которым вычисляются комплексные полюса модели, являющиеся основой статистик обнаружения и оценивания, осуществляется на основании всего принятого сигнала длиной $N = 256$. При обнаружении сигналов, отраженных от скоростных целей, возможен компромисс, основанный на обработке отраженных сигналов по сегментам. Предполагая неизменность параметров АР модели для всего обрабатываемого сигнала, минимизируется сумма частных ошибок предсказания, записанных для отдельных сегментов сигнала. Для выбранного тестового сигнала длина сегмента выбрана равной длительности импульса РИП, а их число определяется количеством импульсов РИП, принятых за время анализа РЛС.

В третьей главе приведены результаты моделирования и сравнительного анализа статистических показателей качества исследуемого многосегментного АР алгоритма обработки сигналов. Сравнение проведено по отношению к исходному несегментированному АР алгоритму и к оптимальному обнаружителю.

Для того чтобы оценить минимально возможные потери многосегментного АР алгоритма, построены ХО (зависимость вероятности правильного обнаружения (ВПО) от ОСШ) исходного несегментированного АР алгоритма. На рис. 2 приведены ХО для неподвижной цели при ВЛТ $F=10^{-3}$. Кривая 1 построена для полностью известного сигнала, кривая 2 (пунктир) соответствует ХО сигнала с неизвестной начальной фазой, кривая 3 построена для флюктуирующего по амплитуде сигнала, кривые 4, 5 – ХО АР алгоритма порядка $K=2$ для сигнала с детерминированной и флюктуирующей амплитудами соответственно.

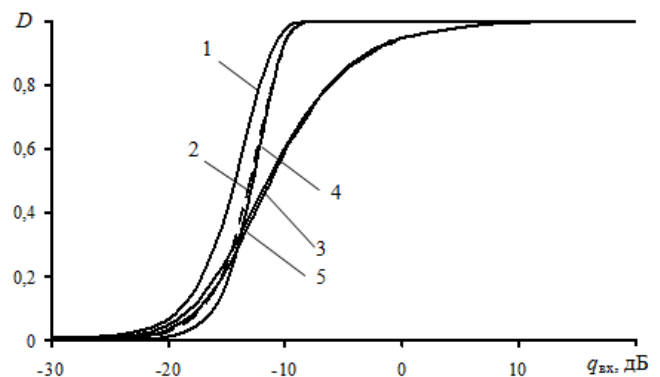


Рис. 2 – ХО для оптимального обнаружителя и АР алгоритма.

На рис. 2 видно, что АР алгоритм проигрывает согласованной обработке в области высоких значений ВПО незначительно (меньше 1 дБ), что позволяет считать АР обнаружитель квазиоптимальным в задачах обнаружения медленных целей.

На рис. 3 показаны ХО исходного АР алгоритма 2-го порядка при доплеровском сдвиге частоты $f_D=0$ (кривые 1, 2, здесь и далее для сигнала с фиксированной и случайной,

распределенной по закону Рэлея, амплитудами соответственно); и $f_D \gg 1/T_{\text{РИП}}$ (кривые 5, 6). Многосегментный АР алгоритм нечувствителен к доплеровскому сдвигу частоты сигнала в пределах от 0 до $1/\tau_n$ (кривые 3, 4). Исследования показали, что количество сегментов L , по которым осуществляется усреднение АР параметров, незначительно влияет на ХО при $L \leq 16$.

Показатели качества АР алгоритмов зависят от используемого порядка модели K , который определяет предельное количество разрешаемых целей. Семейство ХО АР алгоритма для различных порядков модели представлено на рис. 4 (кривые 1, 2 – $K=10$, кривые 3, 4 – $K=2$). С увеличением порядка ХО улучшаются более чем на 2 дБ, что свидетельствует об имеющихся ресурсах для улучшения работы АР обнаружителя. Платой за этот выигрыш является пропорциональное порядку АР модели увеличение вычислительных затрат, необходимых для реализации АР алгоритма обработки в режиме реального времени.

Негативное влияние БЛ ФН проявляется в ухудшении помехоустойчивости РЛС к пассивным помехам. При наличии в определенных дальномерных каналах приема мощных сигналов из-за ненулевых БЛ ФН возрастает ВЛТ в других каналах приема, что затрудняет или делает невозможным обнаружение малоразмерных целей. В связи с этим необходимо оценить выходную реакцию АР обнаружителей при настройке приемника

на другой канал дальности, то есть оценить уровни ВЛТ в каналах приема, в которых априори нет сигнала. На рис. 5 представлены ХО для исходного (кривая 1) и многосегментного (кривая 2) АР алгоритмов (порядок $K=2$), а также зависимости ВЛТ от ОСШ в соседних дальномерных каналах

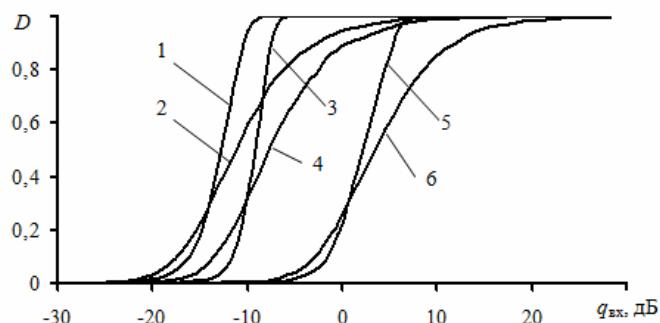


Рис. 3 – Сравнение ХО исходного и многосегментного АР алгоритмов при обнаружении медленных и скоростных целей.

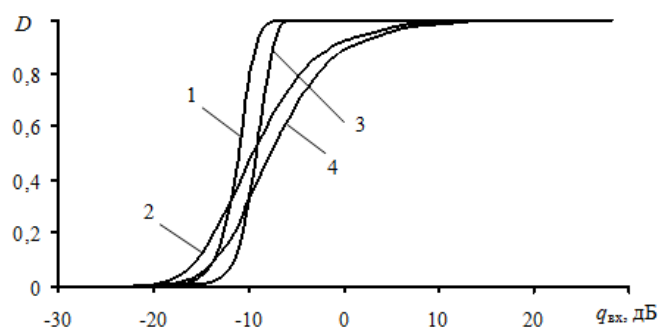


Рис. 4 – ХО АР алгоритма для различных порядков K .

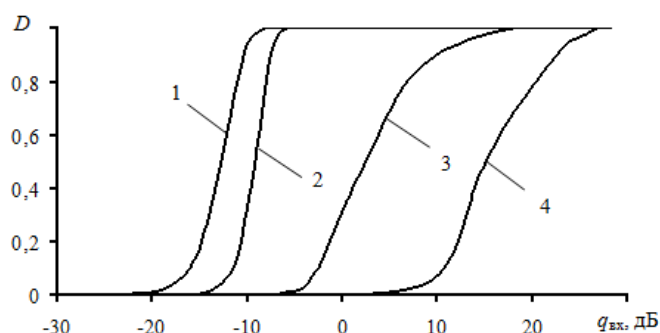


Рис. 5 – ВЛТ в соседних каналах приема для исходного и многосегментного АР алгоритмов.

приема для многосегментного (кривая 3) и исходного (кривая 4) АР алгоритмов. Многосегментный АР алгоритм существенно уступает исходному АР алгоритму и имеет недопустимо высокий уровень ВЛТ, так как при многосегментной обработке длина ЗС фактически ограничена длительностью импульса РИП, что приводит к значительному увеличению УБЛ автокорреляционной функции (АКФ) анализируемого сигнала.

Для устранения зависимости ВЛТ от мощности входного шума предложена модификация рабочей статистики обнаружения, нормированная к мощности ошибки предсказания АР алгоритма. Для нормированной рабочей статистики ХО многосегментного АР алгоритма ухудшились в среднем на 1 дБ, в то время как обычный АР алгоритм проиграл около 2.5 дБ. На основе анализа распределения полюсов АР модели показано, что воздействие мощного мешающего шумоподобного сигнала, отличающегося от полезного задержкой, эквивалентно воздействию шума. Возрастания уровня ВЛТ в соседних каналах приема при воздействии мощного сигнала не наблюдается для обеих нормированных статистик АР алгоритмов, что свидетельствует о стабилизации ВЛТ по всему рабочему диапазону дистанций (задержек).

Усечение ЗС при переходе к посегментной обработке имеет такой же характер, что и усечение сигнала, обусловленное квазинепрерывным режимом работы РЛС. Это позволяет применять многосегментный АР алгоритм для обработки сигналов, принятых от близкорасположенных целей, при которых происходит усечение длины сигнала за счет коммутации сигналом развязки прием-передача, без дополнительных изменений алгоритма.

Помимо собственных шумов, на РЛС воздействуют помехи различного происхождения. Характерным случаем являются отражения сигнала от взволнованной морской поверхности, поэтому далее в главе исследуются ХП к пассивным сигналподобным помехам, поступающими на вход приемника с того же элемента дальности, в котором находится обнаруживаемая цель. Отличия полезного и мешающего сигналов заключаются в доплеровских сдвигах частоты. Сигнал на входе устройства обработки представляет собой аддитивную смесь нормального белого шума, полезного сигнала и мешающих отражений. Сначала рассмотрим влияние на работу исследуемых алгоритмов помех, сосредоточенных по спектру и отличающихся от полезного сигнала значением доплеровского сдвига частоты f_D . Для удобства анализа результатов моделирования, все частоты приведены в нормированном к частоте дискретизации сигнала виде.

Показателем качества алгоритма обработки, характеризующим помехоустойчивость (ХП), принято считать зависимость ВПО одиночного сигнала D от входного ОСШ при воздействии на обнаружитель аддитивной смеси нормального белого шума и сигналподобной помехи значительно большей интенсивности и отличающейся от полезного сигнала значением частоты f_D , на величину Δf . В процессе исследований было выявлено, что мощность помехи практически не

влияет на ХП после превышения значения 15 дБ, что обусловлено нелинейным характером АР алгоритма. В связи с этим ХП построены для одного значения мощности помехи, принятого равным 60 дБ относительно мощности входного шума.

ХП исследованы для различных частотных расстроек сигнала и помехи. Предел разрешения дискретного преобразования Фурье (ПФ), оцениваемый на основании классического критерия Рэлея, равен $1/N$, где N – число отсчетов на входе алгоритма.

ХП для многосегментного АР алгоритма ($K = 2$) представлены в левой части рис. 6. Кривые 1, 2 представляют ХО сигналов с постоянной и флюктуирующей амплитудами соответственно в отсутствие помехи на входе приемника. Они совпадают с ХП для расстройки $\Delta f = 1/2$, кривые 3, 4 соответствуют расстройке $\Delta f = 1/10$, кривые 5, 6 – $\Delta f = 1/256$.

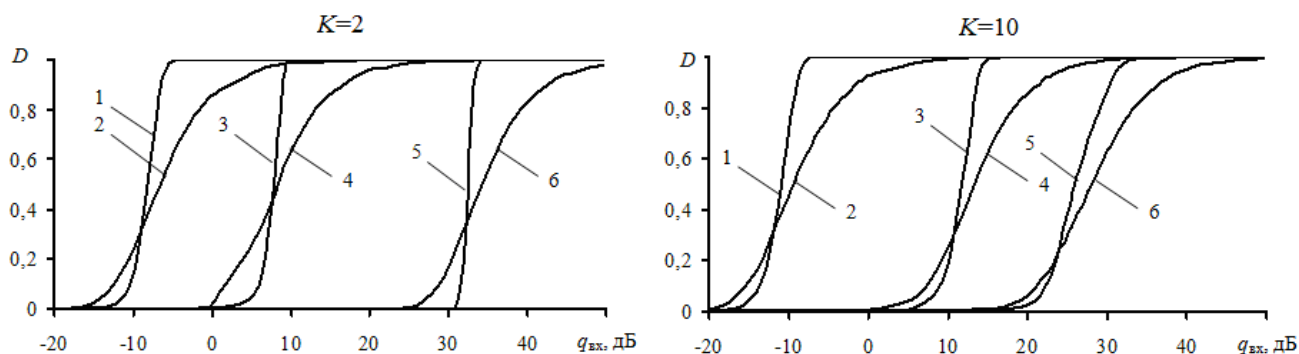


Рис. 6 – ХП многосегментного АР алгоритма порядка $K=2$ и $K=10$.

Порядок модели $K = 2$ в данном случае гарантирует отсутствие побочных максимумов. В модельно-параметрических методах, основанных на АР моделях, максимумы оценки СПМ обусловлены полюсами модели, модули которых стремятся к единичной окружности на комплексной плоскости. Число максимумов в оценке СПМ не может превышать числа полюсов, которое, в свою очередь, определяется порядком модели, поэтому при $K=2$ один полюс модели соответствует полезному сигналу, а второй – помехе. Построенное семейство характеристик показывает, что ХП многосегментного АР алгоритма порядка $K = 2$ существенно проигрывают в ОСШ исходным ХО, и для достижения предела рэлеевской разрешающей способности $1/N$ требуется энергетический запас в 40 дБ во входном ОСШ.

На основании исследованных ХО можно предположить, что увеличение порядка модели приведёт к существенному улучшению ХП. В правой части рис. 6 приведены ХП, построенные для порядка АР модели $K = 10$. Здесь кривым 1, 2 соответствует ХП для расстройки $\Delta f = 1/10$, совпадающая с исходной ХО, кривым 3, 4 – $\Delta f = 1/256$, кривым 5, 6 – $\Delta f = 1/1000$. Повышение порядка АР модели приводит к существенному энергетическому выигрышу. Так, для обеспечения

предела разрешения $1/N$ алгоритму на основе AP модели порядка $K = 10$ требуется запас в 22 дБ, что на 18 дБ меньше, чем в случае использования модели порядка $K = 2$.

На практике часто требуется разрешать сигналы, соизмеримые по мощности и отличающиеся по некоторому параметру. В данной работе в качестве такого параметра выбрана расстройка по доплеровскому сдвигу частоты Δf . Зависимость ВПО двух идентичных по мощности сигналов D_2 от входного ОСШ при фиксированной расстройке по частоте f_D на величину Δf принято называть характеристикой разрешения-обнаружения (ХРО).

Аналогично ХП, семейства ХРО исследовались для 2-х порядков AP моделей: $K = 2$ и $K = 10$. Соответствующие семейства кривых представлены на рис. 7. Для семейства ХРО, построенного при порядке $K = 2$, кривым 1, 2 соответствуют ХРО для расстройки $\Delta f = 1/2$, кривым 3, 4 - $\Delta f = 1/10$, кривым 5, 6 - $\Delta f = 1/256$. Для порядка $K = 10$ кривым 1, 2 соответствуют ХРО для расстройки $\Delta f = 1/10$, кривым 3, 4 - $\Delta f = 1/256$, кривым 5, 6 - $\Delta f = 1/1000$.

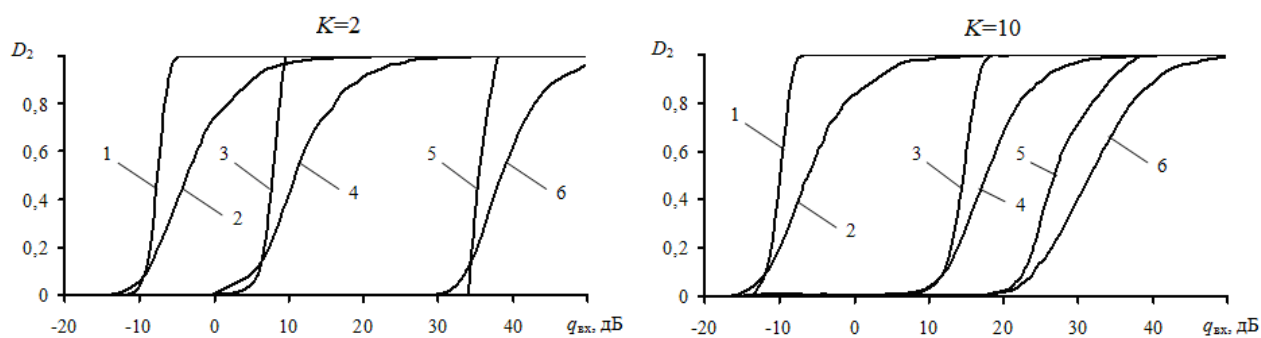


Рис. 7 – ХРО многосегментного AP алгоритма порядка $K=2$ и $K=10$.

Как и для ХП, для ХРО имеет место улучшение характеристик с ростом порядка AP модели. Проведенные исследования показывают, что, имея соответствующий запас в ОСШ, алгоритм успешно разрешает цели в пределах главного лепестка ФН сигнала (кривые 5, 6 в левой части рис. 7, кривые 3, 4, 5, 6 в правой части рис. 7).

Помимо сосредоточенных помех, важную задачу в радиолокации представляет борьба с узкополосными помехами с гладкоокрашенным спектром. Особые проблемы, связанные с помехами данного типа, возникают в морской радиолокации и связаны с отражением зондирующего сигнала от морской поверхности. Отражение от взволнованной морской поверхности представляет случайный процесс, поэтому на практике для описания спектра используют аппроксимации, полученные на основе усреднения СПМ реальных отраженных сигналов. Предложено много различных моделей отраженных сигналов, в данной работе при моделировании помехи используется модель Барлоу, представляющая собой гауссову аппроксимацию СПМ помехи. На практике эффективная ширина спектра сигнала, отраженного от водной поверхности, лежит в пределах от десятков до сотен герц. Компьютерное моделирование

показало, что помехи с такой эффективной шириной спектра воспринимаются многосегментным AP алгоритмом как сосредоточенные. Им соответствует один полюс AP модели, а ХП при воздействии гладкоокрашенных узкополосных помех практически совпадают с аналогичными характеристиками, полученными при воздействии сосредоточенных по спектру помех.

В радиолокации важную роль играет точность измерения параметров цели. Рассмотрим в качестве информационного параметра, подлежащего оценке, доплеровский сдвиг частоты отраженного от цели сигнала. Количественной мерой точности измерений частотных параметров служат дисперсия ошибки измерения частоты гармонического сигнала σ_f^2 и частотное смещение m_f . Зависимости этих величин от входного ОСШ называют ХТ. При построении ХТ предполагается возможное присутствие одного полезного сигнала, AP оценка СПМ отраженного сигнала в этом случае является несмещенной. Качество оценок параметров определяется близостью σ_f^2 к потенциально достижимому пределу Крамера-Рао (КР). Однако предел КР имеет смысл лишь при больших значениях ОСШ, когда вероятность аномальных ошибок низка (то есть полезный сигнал обнаруживается на фоне шума с заданной вероятностью), поэтому более полезным с практической точки зрения является сравнение AP оценок с асимптотически оптимальными оценками максимума правдоподобия (МП).

На рис. 8 приведены ХТ AP- и МП-оценок (кривая 1 – предел КР, кривая 2 – асимптотический предел AP алгоритма для $K = 2$, кривая 3 – оценка МП, кривая 4 – AP

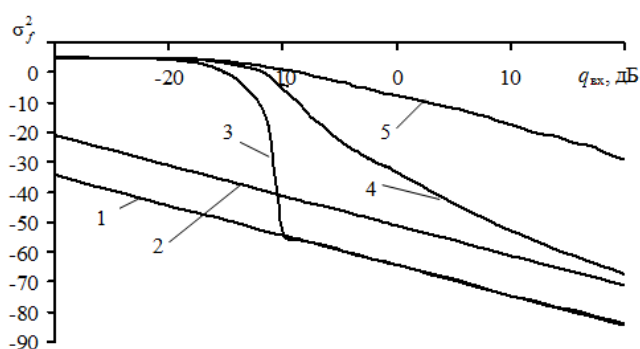


Рис. 8 – ХТ AP алгоритма в сравнении с оценками МП.

оценка для модели порядка $K = 2$ и сигнала с постоянной амплитудой, кривая 5 – AP оценка для $K = 2$ и сигнала с амплитудой, распределенной по закону Рэлея). Асимптотический предел AP алгоритма минимален при $K = N/3$, однако оптимизация порядка хотя и приводит к уменьшению зоны аномальных ошибок, но в то же время реально достижимым оказывается асимптотический предел модели 2-го порядка, что обусловлено рекуррентным характером расчета коэффициентов AP модели по алгоритму Берга.

Асимптотический предел многосегментного AP алгоритма существенно уступает обычному несегментированному AP алгоритму, причем проигрыш прямо пропорционален числу сегментов при равенстве общей численности отсчетов. Выражение для дисперсии оценки нормированной частоты сигнала многосегментного AP алгоритма имеет вид:

$$\sigma_{\text{APM}}^2 = \frac{1}{q_{\text{вх}}^2 \cdot L \cdot K \cdot (N_l - K)^2}, \quad (1)$$

где N_l – длина сегмента. Семейство ХТ многосегментного АР алгоритма для различных значений L приведено на рис. 9 (АР модель порядка $K=1$, сигнал с детерминированной амплитудой). На рис. 9 кривым 1, 2 соответствуют асимптотические пределы многосегментного АР алгоритма для количества сегментов $L=1$ и $L=32$ соответственно, кривым 3, 4 – ХТ для многосегментного АР алгоритма при $L=1$ и $L=32$. ХТ для промежуточных значений L лежат между кривыми 3 и 4.

Свойства статистического разрешения-измерения частотных параметров исследовались при воздействии на вход рассматриваемых алгоритмов суммарного сигнала, содержащего аддитивную смесь двух идентичных в статистическом смысле сосредоточенных по параметру разрешения сигналов и нормального белого шума. В этом случае оценка частотного параметра является смещенной.

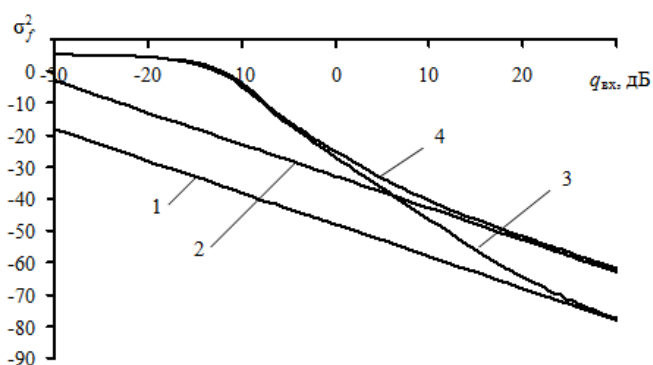


Рис. 9 – ХТ многосегментного АР алгоритма.

В задаче разрешения-измерения возможны две характерные ситуации: сигналы расстроены по параметру разрешения Δf на величину, существенно большую рэлеевского предела разрешения $N\Delta f \gg 1$, и сигналы расстроены на величину, меньшую рэлеевского предела $N\Delta f < 1$. В первом случае предел КР практически не изменяется, не изменяется также асимптотический предел для АР алгоритма. Поэтому для случая $N\Delta f \gg 1$ ХРИ для дисперсии оценки практически совпадают с ХТ. Зависимость смещения оценки от входного ОСШ для исходного АР алгоритма обработки совпадает с аналогичной характеристикой для многосегментного алгоритма, причем число сегментов практически не оказывает влияния. Эти зависимости приведены на рис. 10 (кривая 1 построена для сигнала с постоянной амплитудой, кривая 2 – со случайной).

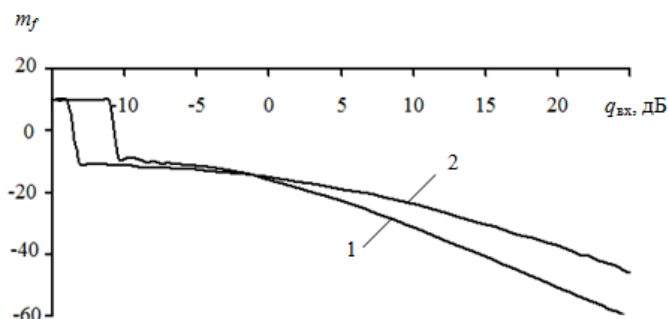


Рис. 10 – Смещение оценки АР алгоритма.

Во втором случае, при $N\Delta f < 1$, строгого выражения для предела КР не найдено, однако известно, что он зависит не только от Δf , но и от разности фаз разрешаемых сигналов $\Delta\phi$. Это приводит к различному характеру зависимости предела КР $\sigma_{\text{КР}}^2$ от $\Delta\phi$: при $\Delta\phi \neq n\pi$ предел КР

пропорционален $(1/\Delta f)^2$, при $\Delta\varphi \approx n\pi$ предел КР пропорционален величине $(1/\Delta f)^4$, что существенно снижает потенциальную точность измерения частоты.

Зависимость дисперсии оценки от частотной расстройки разрешаемых сигналов при фиксированном ОСШ (ОСШ принято равным 100 дБ, что гарантирует работу в области нормальных оценок) для АР алгоритма при $K = 2$ приведена в левой части рис. 11 (кривая 1 построена для сигнала с постоянной амплитудой, кривая 2 – для сигнала со случайной амплитудой).

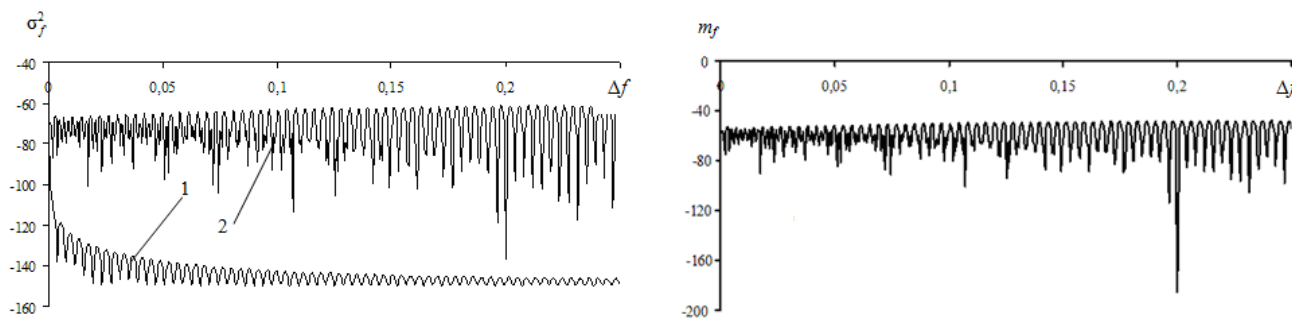


Рис. 11 – Зависимость дисперсии и смещения оценки АР алгоритма от частотной расстройки разрешаемых сигналов.

Как показало моделирование, характер амплитуды анализируемого сигнала (постоянная или случайная) практически не влияет на величину смещения оценки. Зависимость смещения оценки от частотной расстройки приведена в правой части рис. 11.

При фиксированной частотной расстройке характерные пульсации на рис. 11 показывают зависимость ХРИ от разности фаз разрешаемых сигналов. В области больших частотных расстроек амплитуда пульсаций мала, в то время как для близко расположенных сигналов она резко возрастает. При уменьшении частотной расстройки ХРИ резко ухудшаются. Причиной этому явлению является существенное увеличение области аномальных ошибок.

Исследования показали, что зависимость дисперсии и смещения оценки от частотной расстройки для многосегментного АР алгоритма имеет сложный характер. На рис. 12 приведены эти зависимости при числе сегментов $L = 8$ (кривая 1 построена для сигнала с фиксированной амплитудой, кривая 2 – для сигнала с амплитудой, распределенной по закону Рэлея). Увеличение порядка АР модели позволяет улучшить ХРИ за счет уменьшения зоны аномальных ошибок. Однако исследования гистограммы полюсов моделей показали, что для больших порядков модели может нарушаться однозначность соответствия сигнала от цели и полюса модели, то есть одной цели могут соответствовать несколько полюсов. При моделировании за оценку частоты брался полюс, аргумент которого был ближе всего к частоте сигнала, при этом ошибка оценки частоты оказывалась минимальной. В реальных условиях такой алгоритм оценки частоты, как правило, не

реализуется, так как частота цели является параметром неизвестным, и, следовательно, невозможно сразу ассоциировать ей ближайший полюс модели.

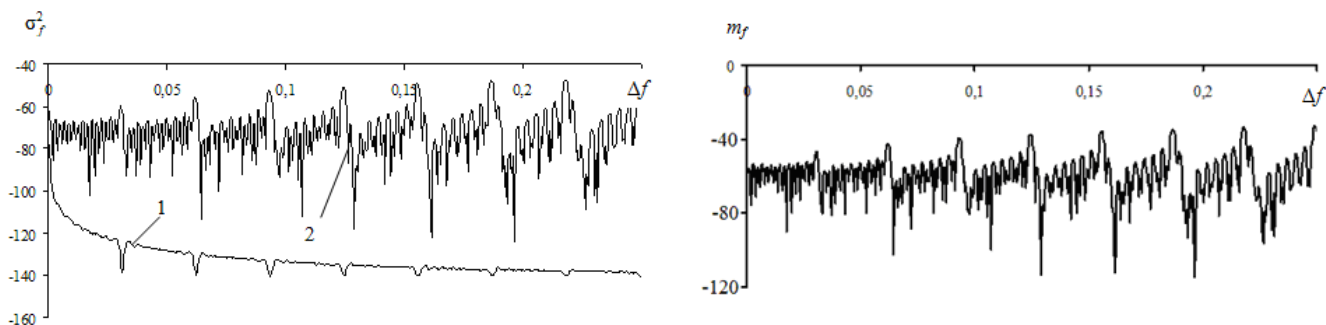


Рис. 12 – Зависимость дисперсии и смещения оценки многосегментного AP алгоритма от частотной расстройки разрешаемых сигналов при числе сегментов $L = 8$.

На практике целесообразно реализовывать совместное обнаружение и оценивание параметров сигнала. В этом случае оценивание на основе рабочей статистики измерения осуществляется после принятия решения об обнаружении сигнала. Это приводит к исключению аномальной области из рассмотрения и резкому улучшению ХТ в переходной зоне.

Таким образом, в работе исследованы основные показатели качества разработанного многосегментного AP алгоритма обработки сигналов. Полученные характеристики позволяют сделать вывод о его перспективности в задачах разрешения-обнаружения и высокой помехоустойчивости.

В **приложении 1** производится оценка вычислительных затрат, требуемых для реализации предлагаемых AP алгоритмов в режиме реального времени.

В **приложении 2** приведена методика оценки доверительных интервалов при исследовании показателей качества алгоритмов обработки методом статистического моделирования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Доказана возможность применения многосегментного AP алгоритма обработки сигналов для обнаружения скоростных целей в диапазоне доплеровских сдвигов частоты сигнала $f_D \in [0; 1/\tau_{\text{ч}}]$, где $\tau_{\text{ч}}$ – длительность чипа ЗС. При этом устраняется неоднозначность измерения скорости цели, обусловленная наличием БЛ ФН на частотах, кратных основной частоте повторения сигнала развязки, обеспечивающего работу приемника и передатчика РЛС на одну антенну.

2. Многосегментный AP алгоритм обработки сигналов является квазиоптимальным (проигрывает менее 3 дБ) по отношению к согласованной обработке при сравнении ХО сигналов от медленных целей при ВПО $D=0.9$, ВЛТ $F=10^{-3}$ и длине анализируемой выборки $N=256$.

3. Разработанный многосегментный АР алгоритм при использовании нормированной статистики обнаружения для выбранного типа сигнала с псевдослучайной структурой фазового кода не чувствителен к помехам, поступающим от соседних дальномерных каналов, и обеспечивает постоянную ВЛТ.

4. Получены семейства ХП многосегментного АР алгоритма для различных порядков АР модели, мощности и частотной расстройки сигналорободной помехи, которые показали, что при низких порядках модели $K=2$ для обнаружения сигнала в присутствии помехи с малой частотной расстройкой $\Delta f=1/10$ и мощностью 60 дБ необходим запас во входном ОСШ около 15 дБ, в то время как при порядках модели $K \geq 10$ ХП практически совпадают с исходными ХО.

5. Получены ХРО для разработанного многосегментного АР алгоритма, показывающие возможность разрешения-обнаружения сигналов в пределах главного лепестка ФН сигнала и позволяющие оценить необходимое ОСШ на входе алгоритма.

6. Получено аналитическое выражение для асимптотического предела дисперсии оценки частоты многосегментного АР алгоритма, который зависит от количества сегментов анализируемого сигнала. Построенные ХТ уступают аналогичным характеристикам асимптотически оптимальной оценки МП, причем проигрыш пропорционален количеству сегментов.

7. Получены ХРИ многосегментного АР алгоритма для дисперсии и смещения оценки частот разрешаемых сигналов. Дисперсия оценки при совместном разрешении-измерении двух сигналов равной интенсивности резко возрастает с уменьшением частотной расстройки, что обусловлено влиянием на ХТ разности фаз разрешаемых сигналов, а так же увеличением зоны аномальных ошибок.

8. Оценены вычислительные затраты, необходимые для реализации исследуемых АР алгоритмов. Современные ЦСП позволяют реализовать их в режиме реального времени при одновременном параллельном обзоре всех дальномерных каналов с последующим доплеровским анализом.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что многосегментный АР алгоритм обработки сигналов может рассматриваться как самостоятельный алгоритм совместного обнаружения и оценивания частотных параметров сигналов, отраженных от скоростных целей. Полученные характеристики позволяют считать его квазиоптимальным по отношению к согласованной обработке в задачах обнаружения. В то же время он обладает свойством высокого разрешения-обнаружения и высокой помехоустойчивостью к сосредоточенным по спектру и узкополосным помехам.

ПУБЛИКАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Кутузов В.М., Мазуров К.А. Многоsegmentный авторегрессионный алгоритм обработки сложномодулированных сигналов: характеристики обнаружения / Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2009. Вып. 4. С. 43–50.
2. Кутузов В.М., Мазуров К.А. Многоsegmentный авторегрессионный алгоритм обработки сложномодулированных сигналов: характеристики помехоустойчивости / Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2010. Вып. 6. С. 37–41.
3. Кутузов В.М., Мазуров К.А. Многоsegmentный авторегрессионный алгоритм обработки сложномодулированных сигналов в задачах обнаружения скоростных целей / Радиотехника, 2012. Вып. 7. С. 33-38.
4. Кутузов В.М., Мазуров К.А. Многоsegmentный авторегрессионный алгоритм обработки сложномодулированных сигналов: характеристики точности / Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2012. Вып. 3. С. 53-59.

В сборниках трудов международных, всероссийских и межвузовских конференций

5. Мазуров К.А. Характеристики точности многоsegmentного авторегрессионного алгоритма обработки квазинепрерывных радиолокационных сигналов.// Труды V международного конгресса «Цели развития тысячелетия» и инновационные принципы устойчивого развития Арктических регионов», 2012 г., Санкт-Петербург.