

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ  
ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 621.317+519.688

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОРЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ  
ПРИ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛА РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО КАНАЛА  
КРАЙНЕВЫСОКОЧАСТОТНОГО  
РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРА-РАДИОМЕТРА

© 2020 г. А. В. Кашин<sup>а</sup>, Н. С. Корнев<sup>а</sup>, Н. А. Макарычев<sup>а</sup>,  
С. В. Марьевский<sup>а</sup>, К. В. Минеев<sup>а</sup>, \*, А. В. Назаров<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Филиал ФГУП «РФЯЦ – ВНИИ экспериментальной физики»

«Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»  
Россия, 603137, Нижний Новгород, ул. Тропинина, 47

\*e-mail: mineevkv@gmail.com

Поступила в редакцию 23.07.2019 г.

После доработки 01.08.2019 г.

Принята к публикации 14.08.2019 г.

Рассматривается метод цифровой обработки сигнала радиометрического канала крайневыхочастотного радиointерферометра-радиометра, работающего в активно-пассивном режиме. В основу алгоритма цифровой обработки положен метод представления сигнала авторегрессионной моделью. Предложен критерий выбора оптимального порядка модели. Применение предложенного алгоритма позволяет сократить время обработки экспериментальных результатов более чем в 2 раза по сравнению с используемыми ранее методами.

DOI: 10.31857/S0032816220010036

## ВВЕДЕНИЕ

Применение радиочастотных методов диагностики позволяет осуществлять непрерывную дистанционную регистрацию процессов, протекающих в оптически непрозрачных материалах, к которым относятся практически все изоляторы, в том числе и твердые взрывчатые вещества (в.в.). Разрабатываются методы, позволяющие регистрировать температуру детонационных фронтов с высокой разрешающей способностью. В радиодиапазоне известен единственный метод дистанционного измерения температуры удаленного объекта – измерение его яркостной температуры с последующим пересчетом ее в термодинамическую температуру через коэффициент отражения.

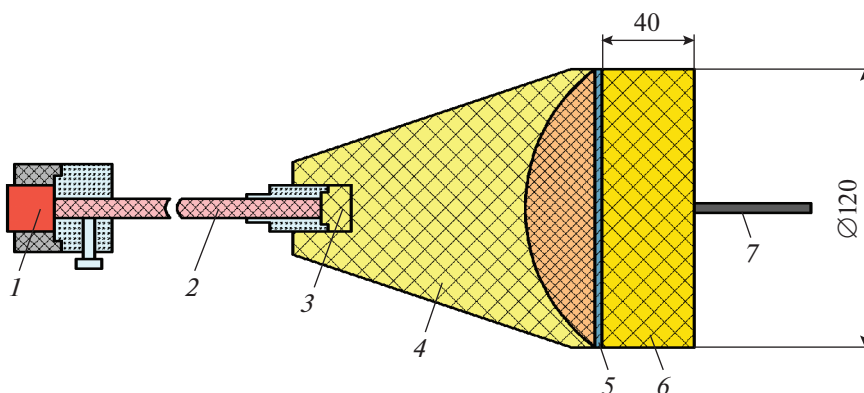
В [1] описывается эксперимент по измерению яркостной температуры детонационного фронта, распространяющегося в образце тринитротолуола (ТНТ), с помощью крайневыхочастотного радиointерферометра с радиометрическим каналом, имеющего временное разрешение 1 мкс и работающего в пассивном режиме (с отключенным передатчиком) по принципу компенсационного радиометра.

Для получения термодинамической температуры исследуемого процесса необходимо, помимо яркостной температуры, определять еще и ко-

эффициент отражения от исследуемого объекта на частоте зондирующего сигнала передатчика, используя активно-пассивный режим измерения.

Такой опыт может быть реализован с применением экспериментальной сборки, эскиз которой представлен на рис. 1.

В начальный момент времени на электродетонатор 1 подается высоковольтный импульс подрыва, синхронизированный с запуском регистрации на цифровом осциллографе сигнала промежуточной частоты с выхода приемо-передатчика крайневыхочастотного радиointерферометра-радиометра. Для формирования плоского детонационного фронта в шашке ТНТ 6 используется линза 4 из в.в. Для экранирования влияния теплового излучения линзы между ней и шашкой ТНТ размещается алюминиевая фольга 5. В качестве приемо-передающей антенны 7 используется плоский торец прямоугольного диэлектрического волновода, введенный в плотный контакт с поверхностью шашки ТНТ. На рис. 2 приведен участок экспериментального сигнала промежуточной частоты, соответствующий распространению детонации в ТНТ. Вертикальными сплошными линиями обозначены моменты входа детонации в шашку ТНТ и выхода из нее.



**Рис. 1.** Эскиз экспериментальной сборки. 1 – электродетонатор, 2 – линия задержки из пластика в.в., 3 – промежуточный детонатор, 4 – генератор плоской волны (линза), 5 – алюминиевая фольга, 6 – шашка ТНТ, 7 – антенная система.

В спектре принимаемого радиометром радиояркого сигнала будет присутствовать мощная гармоническая составляющая сигнала передатчика. Для получения радиометрического сигнала теплового шума исследуемого объекта, мощность которого пропорциональна яркостной температуре, на этапе отложенной цифровой обработки из зарегистрированного сигнала необходимо полностью исключить гармоническую составляющую сигнала передатчика. Затем, как описано в [1], по калибровочной сетке радиометра пересчитать суммарную мощность оставшихся шумовых спектральных составляющих в яркостную температуру.

В [2] для исключения сигнала передатчика применяется алгоритм узкополосной фильтрации во временной области. Преимуществом дан-

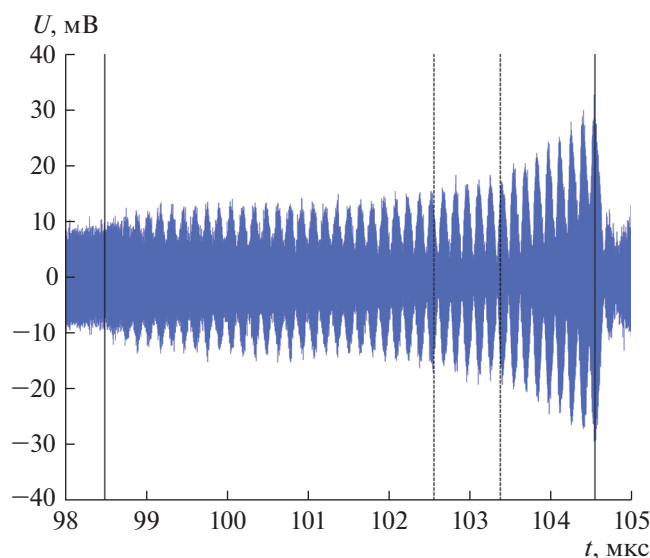
ного алгоритма является его универсальность, однако программный синтез цифровых фильтров высоких порядков требует применения п.э.в.м. с большой вычислительной мощностью.

В [2] также рассмотрен алгоритм нелинейной фильтрации в частотной области, реализуемый путем исключения самых мощных дискретных составляющих амплитудного спектра Фурье. Отмечено, что использование такого алгоритма приводит к проявлению эффекта Гиббса, к тому же в спектре шумового сигнала остается значительное число спектральных составляющих среднего уровня, обусловленных узкополосным сигналом, что оказывает отрицательное влияние на точность расчета яркостной температуры.

Однако, как показали проведенные авторами настоящей статьи исследования, представление исходного сигнала параметрической авторегрессионной (а.р.) моделью позволяет получить более точную оценку спектральной плотности мощности (с.п.м.) процесса и реализовать описанный в [2] алгоритм нелинейной фильтрации в частотной области.

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Свойства а.р.-модели позволяют рассчитать ее параметры и связанную с ней функцию с.п.м. процесса в предположении, что автокорреляционная последовательность исследуемого случайного процесса известна. Однако на практике, как правило, автокорреляционная последовательность неизвестна, поэтому спектральная а.р.-оценка основывается на уже имеющихся отчетах данных. В настоящее время разработано большое количество алгоритмических методов получения спектральных а.р.-оценок [3, 4]. Все эти методы можно разбить на две категории: алгоритмы для обработки блоков данных и алгоритмы для обработки последовательных данных.



**Рис. 2.** Экспериментальный сигнал промежуточной частоты.

В условиях решаемой задачи рассмотрены методы, предназначенные для обработки блоков накопленных отсчетов данных некоторой реализации сигнала. Блочные методы представляют собой алгоритмы с фиксированным временем, рекурсивные относительно порядка в том смысле, что они применяются к фиксированным блокам временных отсчетов данных и позволяют рекурсивным образом получать оценки параметров а.р.-модели более высокого порядка по оценкам параметров а.р.-модели более низкого порядка. Степень повышения разрешения и достоверности спектральной оценки встречающихся на практике детерминированных и стохастических процессов с дискретным временем определяется соответствием выбранной модели анализируемому процессу [4].

В основе а.р.-моделей лежит предположение о том, что текущее значение а.р.-процесса  $X_t$  линейно зависит от некоторого количества предыдущих значений этого процесса  $X_{t-1}, \dots, X_{t-p}$  и выражается как конечная линейная совокупность предыдущих значений процесса и возмущения  $\varepsilon_t$  [5]:

$$X_t = C + \alpha_1 X_{t-1} + \alpha_2 X_{t-2} + \dots + \alpha_p X_{t-p} + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где  $p$  – порядок а.р.-модели;  $C$  – вещественная константа;  $\alpha_1, \dots, \alpha_p$  – параметры модели (коэффициенты авторегрессии);  $\varepsilon_t$  – случайная ошибка с нулевым математическим ожиданием, конечной дисперсией и единичной автокорреляционной матрицей, подтверждающей отсутствие автокорреляции между уровнями ряда ошибок (отклонений).

Коэффициенты авторегрессии рассчитываются из системы уравнений Юла–Уокера, а минимальный порядок определяется из априорных сведений об исследуемом сигнале и должен быть в два раза больше числа синусоидальных колебаний, содержащихся в анализируемом сигнале на фоне общего уровня шума. Чем меньше отношение сигнал/шум, тем больше должен быть порядок а.р.-модели.

Существует множество критериев выбора порядка а.р.-модели. В общем случае они представляют собой целевые функции, оптимизирующие по двум параметрам: ошибке линейного предсказания (бесконечно уменьшающейся при увеличении порядка а.р.-модели) и избыточному порядку. В условиях решаемой задачи в большинстве общеизвестных критериев (критерий окончательной ошибки предсказания, информационный критерий Акаике, авторегрессионная передаточная функция критерия и т.п.) ошибка линейного предсказания сильно превалирует над избыточным порядком, что приводит к завышенному значению порядка а.р.-модели. При излишнем большом порядке увеличивается спектральное разрешение, но в с.п.м. процесса появляются

ложные составляющие, отрицательно влияющие на конечный результат цифровой обработки.

Для выделения слабого широкополосного сигнала теплового шума на фоне сильного узкополосного сигнала передатчика из с.п.м. а.р.-процесса, соответствующего исходному сигналу, исключаются отсчеты, соответствующие спектральным составляющим сигнала передатчика. При недостаточном исключении отсчетов из с.п.м. а.р.-процесса оставшиеся отсчеты сигнала передатчика могут внести значительную погрешность в расчет средней мощности шумового сигнала. При избыточном исключении отсчетов происходит потеря статистических данных.

При исключении  $k$  отсчетов сигнала передатчика из с.п.м. а.р.-процесса, содержащей  $N$  отсчетов, с.п.м. оставшихся  $n = N - k$  отсчетов теплового шума по форме приближается к с.п.м. белого гауссова шума. Чем точнее выбран порядок  $p$  а.р.-модели, тем лучше а.р.-процесс соответствует исходному сигналу и тем ближе с.п.м. оставшихся  $n$  отсчетов теплового шума а.р.-процесса к равномерно распределенной в рабочей полосе частот с.п.м. белого гауссова шума.

Для расчета оптимального порядка а.р.-модели авторами был разработан критерий, минимизирующий отклонение с.п.м. анализируемого а.р.-процесса после исключения из нее заданного количества отсчетов от с.п.м. эквивалентного белого гауссова шума.

Целевая функция отклонения от с.п.м. белого гауссова шума определяется формулой:

$$\xi = \sum_{i=1}^n (P_{f_i}(k, p) - W_0)^2, \quad (2)$$

где  $n$  – число оставшихся отсчетов с.п.м.;  $P_{f_i}(k, p)$  – с.п.м. а.р.-процесса, представляемого а.р.-моделью порядка  $p$  после исключения  $k$  отсчетов;  $W_0$  – с.п.м. эквивалентного белого гауссова шума, вычисленная как среднее значение с.п.м. а.р.-процесса после исключения  $k$  отсчетов по формуле:

$$W_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{f_i}(k, p). \quad (3)$$

Численным методом варьируются значения порядка  $p$  а.р.-модели и находится минимум отклонения  $\xi$ , соответствующий оптимальному порядку а.р.-модели для заданного количества исключаемых отсчетов  $k$ . По оставшимся составляющим с.п.м. а.р.-процесса, представляемого а.р.-моделью оптимального порядка, рассчитывается средняя мощность сигнала:

$$\bar{P} = \frac{f_d}{n} \sum_{i=1}^n P_{f_i}(k, p), \quad (4)$$

где  $f_d$  – частота дискретизации.

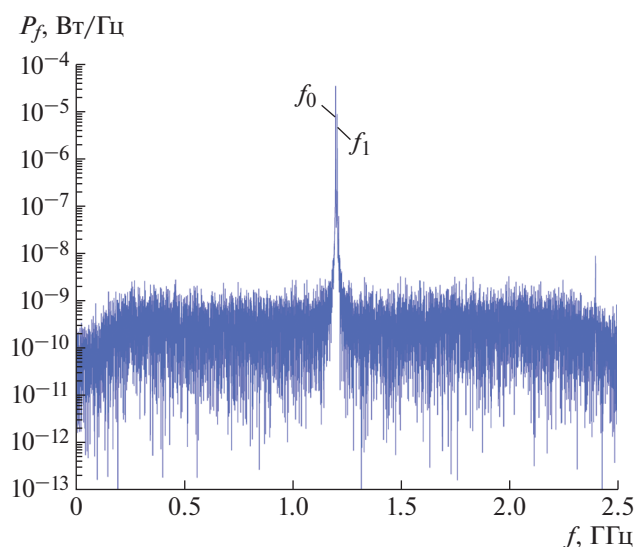


Рис. 3. Спектральная плотность мощности участка сигнала промежуточной частоты.

Расчет яркостной температуры исследуемого объекта проводится в скользящем окне размером  $N$  отсчетов по формуле:

$$T_{я_i} = \alpha \bar{P}_i - \beta, \quad (5)$$

где  $i$  – номер скользящего окна;  $P_i$  – средняя мощность сигнала в скользящем окне  $i$ , рассчитанная по  $n$  отсчетам;  $\alpha$  и  $\beta$  – калибровочные коэффициенты, значения которых находятся при обработке сигналов, полученных на этапе калибровки радиометрического канала по эталонам яркостных температур.

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Применим описанную выше методику при обработке сигнала, полученного при проведении газодинамического эксперимента по измерению тепловых характеристик распространяющегося в образце ТНТ детонационного фронта с помощью крайневсочастотного радиоинтерферометра-радиометра, работающего в активно-пассивном режиме [2].

Согласно рис. 2, детонация в шашке ТНТ начинается в момент времени  $t_n = 98.5$  мкс, а выход детонации на поверхность наблюдается в момент времени  $t_k = 104.5$  мкс. Биения являются следствием интерференции поступающих на вход приемника волн, отраженных от движущегося фронта детонации и от области контакта антенны с неподвижным торцом исследуемого объекта.

На рис. 3 представлена с.п.м., вычисленная с помощью быстрого преобразования Фурье для окна размером  $N = 4096$  отсчетов, соответствующего

при частоте дискретизации  $f_d = 5$  ГГц участку экспериментального сигнала от момента времени  $t_1 = 103.2$  мкс до момента времени  $t_2 = 104$  мкс (на рис. 2 данный участок отмечен штриховыми линиями).

Из рис. 3 следует, что в спектре наибольшие значения мощности имеют гармоники с частотами  $f_0 = 1200$  МГц и  $f_1 = 1207$  МГц, соответствующие сигналу, отраженному от неподвижного переднего торца сборки, и сигналу, отраженному от движущегося детонационного фронта, соответственно. Кроме этого, в с.п.м. присутствуют несколько дискретных комбинационных составляющих, мощность которых в несколько раз превышает средний уровень шумовых составляющих. Эти составляющие также необходимо исключить. Важным условием является полное устранение из с.п.м. самых мощных дискретных спектральных составляющих без значительной потери статистических данных.

Оптимальное количество исключаемых отсчетов выбиралось из  $k = 20, 50, 100, 200$  отсчетов, что соответственно составляло 1, 2.5, 5, 10% от общего количества отсчетов  $N$ . С.п.м. а.р.-процесса вычислялась с помощью модифицированного ковариационного метода, имеющего высокую разрешающую способность при отсутствии расщепления спектральных составляющих.

Зависимости целевых функций отклонений  $\xi$  от порядка  $p$  а.р.-модели, вычисленные в рабочей частотной полосе 0.5–2.5 ГГц для каждого выбранного количества исключаемых отсчетов  $k$ , представлены на рис. 4.

Согласно критерию, минимизирующему целевую функцию отклонения  $\xi$ , оптимальные значения порядка а.р.-модели для  $k = 20, 50, 100, 200$  соответственно составили  $p = 235, 109, 60, 36$ . Графики с.п.м. процессов после исключения  $k$  отсчетов представлены на рис. 5.

Согласно рис. 5а, в с.п.м. а.р.-процесса после исключения 20 отсчетов еще остается некоторое количество мощных комбинационных спектральных составляющих, вклад которых будет значителен при расчете мощности оставшегося теплового шума. С уменьшением количества исключаемых отсчетов вклад комбинационных составляющих только возрастет. В с.п.м., представленной на рис. 5б, мощные спектральные составляющие отсутствуют, а.р.-модель с достаточной степенью точности описывает исходный сигнал. Из рис. 5в и 5г следует, что с увеличением количества исключаемых отсчетов оптимальный порядок а.р.-модели снижается, однако увеличивается количество исключенных спектральных составляющих теплового шума исследуемого объекта, что приводит к потере статистических данных. Таким образом, для расчета яркостной температуры детонацион-

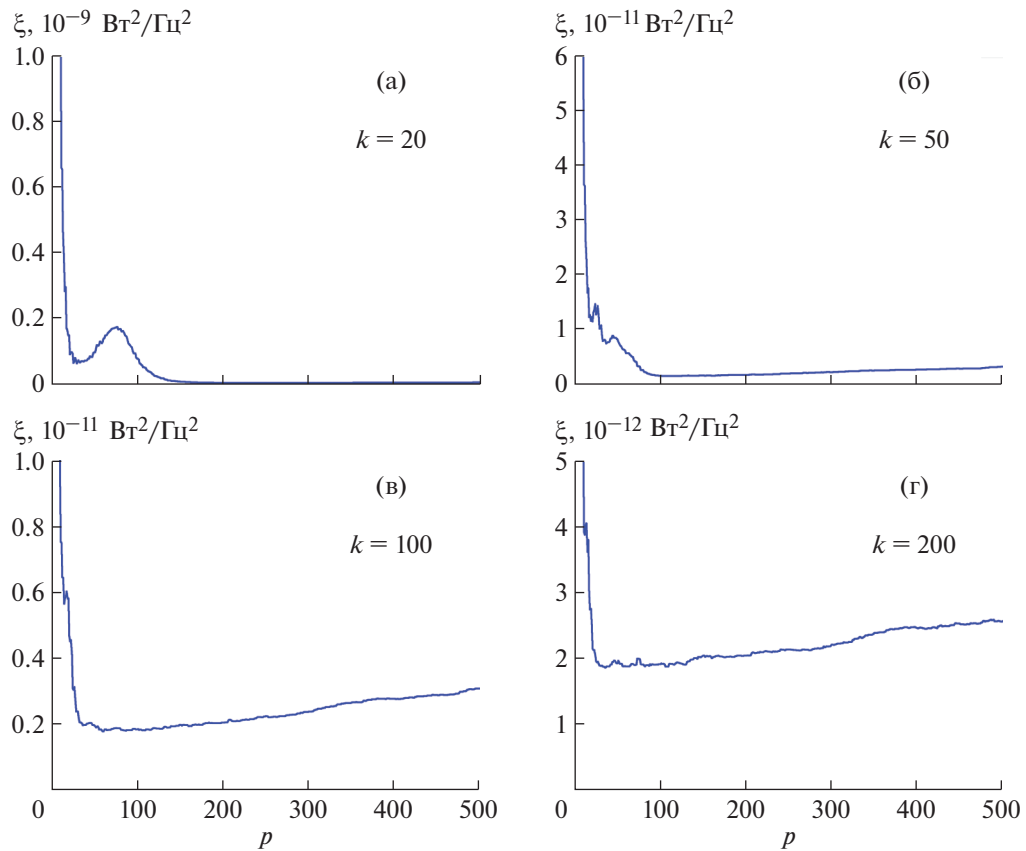


Рис. 4. Зависимости целевых функций от порядка а.р.-модели при различном количестве исключаемых отсчетов  $k$ .

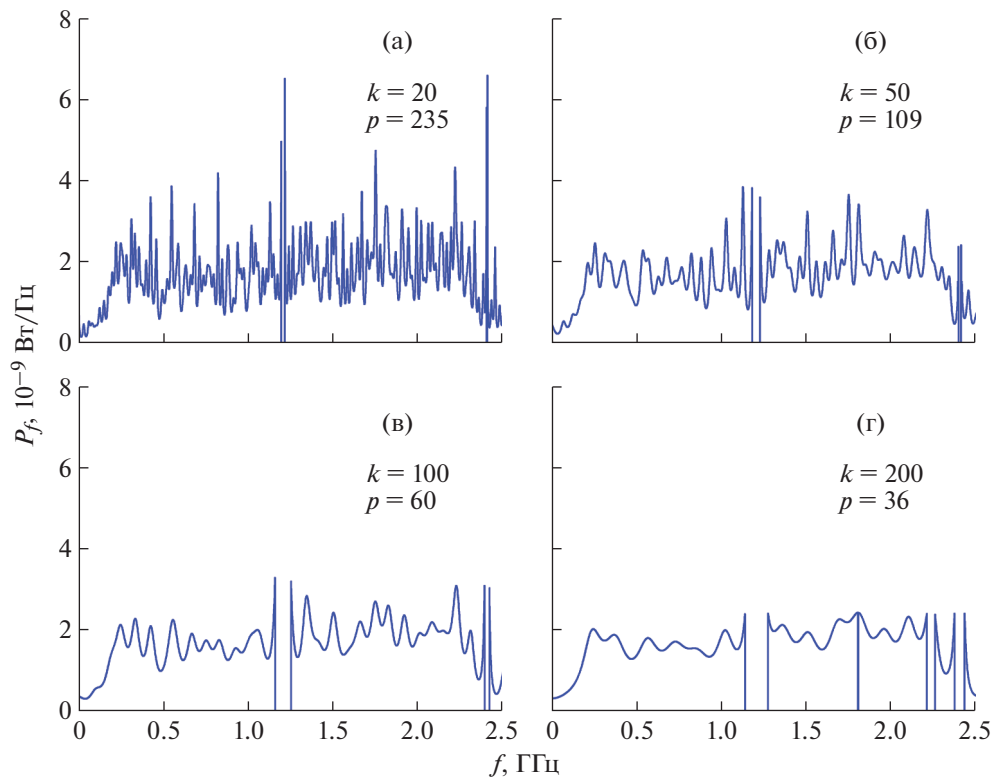
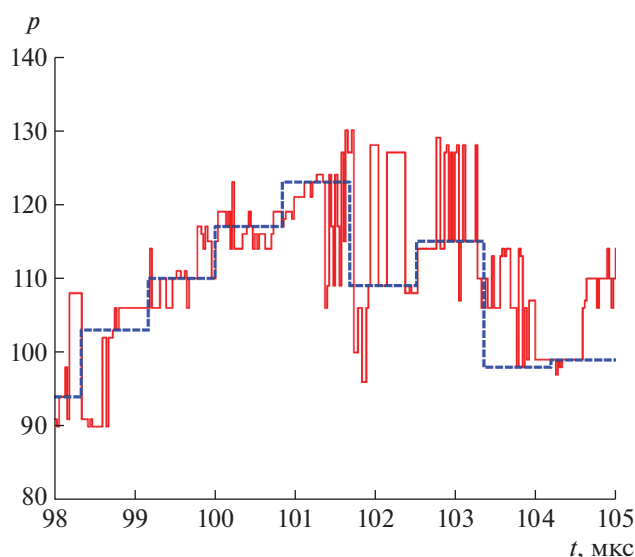


Рис. 5. Спектральная плотность мощности после исключения  $k$  отсчетов при оптимальных порядках а.р.-модели.



**Рис. 6.** Оптимальный порядок а.р.-модели при  $k = 50$ . Сплошная линия — в каждом окне; штриховая линия — в соседних окнах.

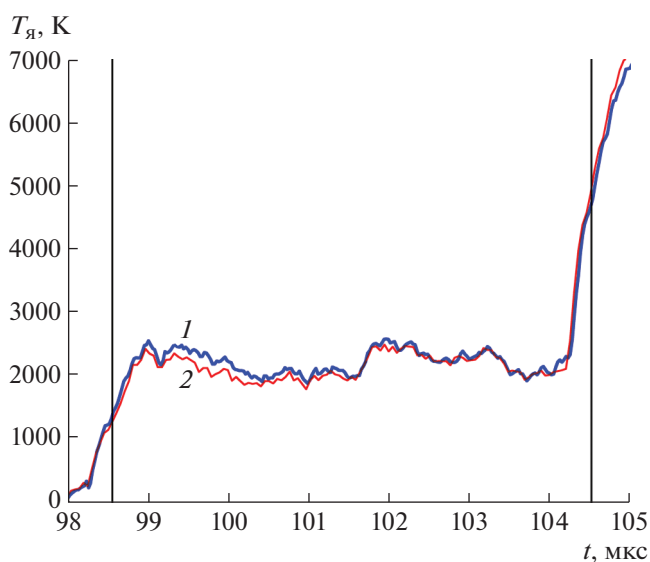
ного фронта целесообразно выбрать количество исключаемых отсчетов  $k = 50$ .

Расчет яркостной температуры детонационного фронта проводился в скользящем окне размером 4096 отсчетов, что соответствует длительности окна, примерно равной 0.8 мкс, с шагом 128 отсчетов. Распределение вычисленного оптимального порядка а.р.-модели для каждого окна на всем участке экспериментального сигнала промежуточной частоты, соответствующего распространению детонации в ТНТ, представлено сплошной линией на рис. 6.

Согласно рис. 6, для каждого окна при исключении из с.п.м. 50-ти самых мощных спектральных составляющих оптимальный порядок а.р.-модели находится в пределах от 90 до 130.

Расчет оптимального порядка а.р.-модели в каждом скользящем окне требует существенного времени вычислений, поэтому в условиях решаемой задачи целесообразно вычислить оптимальный порядок а.р.-модели только на соседних интервалах, т.е. разбить участок экспериментального сигнала на несколько неперекрывающихся между собой интервалов по 4096 отсчетов и на каждом интервале вычислить оптимальный порядок. Затем использовать полученное значение в расчетах для всех скользящих окон, большая часть отсчетов которых попадает в данный интервал. Значения оптимального порядка а.р.-модели, вычисленные для соседних интервалов, представлены на рис. 6 штриховой линией.

График яркостной температуры, рассчитанный с использованием а.р.-модели, представлен на рис. 7 (кривая 1). Здесь же для сравнения при-



**Рис. 7.** График яркостной температуры. 1 — расчет с использованием а.р.-модели; 2 — расчет с использованием узкополосной фильтрации.

веден график яркостной температуры из работы [2], полученный с применением узкополосной фильтрации (кривая 2). В обоих случаях обработке подвергался один и тот же участок экспериментального сигнала. Вертикальными линиями обозначены моменты входа детонации в шашку ТНТ и выхода из нее.

В соответствии с кривой 1 на рис. 7 до момента времени  $t = 98$  мкс регистрируется тепловой шум исследуемого объекта, находящегося при температуре окружающей среды  $T_0 = 278$  К. Начиная с момента времени  $t = 98$  мкс, когда скользящее окно усреднения соприкасается с участком сигнала, соответствующим началу детонации в образце, наблюдается рост яркостной температуры и затем — стационарный участок. При этом радиометр фиксирует относительно стабильную яркостную температуру фронта детонации в объеме в.в. С момента времени  $t = 104$  мкс начинается резкий рост яркостной температуры, обусловленный выходом детонации на поверхность образца в.в. и ударным разогревом прилегающего к нему воздуха. При этом происходит разрушение антенно-фидерной системы.

Средняя яркостная температура детонационного фронта, рассчитанная для зависимости, полученной с использованием а.р.-модели, составила  $T_{я} = 2153 \pm 353$  К. Средняя яркостная температура детонационного фронта, рассчитанная для зависимости, полученной с применением узкополосной фильтрации, составила  $T_{я} = 2156 \pm 354$  К. Совпадение данных результатов свидетельствует о возможности применения предложенного алгоритма цифровой обработки с использованием ав-

торегрессионной модели при расчете яркостной температуры быстропротекающего процесса по сигналу радиоинтерферометра-радиометра, работающего в активно-пассивном режиме. При этом разработанный метод позволяет сократить время обработки результатов газодинамических экспериментов приблизительно в 2.5 раза по сравнению с методами, описанными в [2]. В частности, обработка осциллограммы сигнала длительностью 50 мкс (файл формата TSV размером 21 Мбайт) с применением предложенного алгоритма на э.в.м. с процессором i5-6400 ( $4 \cdot 2.7$  ГГц) и объемом оперативного запоминающего устройства 16 Гбайт занимает не более 4 мин, в то время как продолжительность обработки той же осциллограммы с использованием алгоритмов работы [2] составляет около 10 мин.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При обработке экспериментальных данных, полученных с помощью крайневых высокочастотного радиоинтерферометра-радиометра, работающего в активно-пассивном режиме, определяющим фактором, существенно влияющим на достоверность результатов, является нахождение минимального количества исключаемых отсчетов, при котором полностью ликвидируется вклад мощных спектральных составляющих отраженного сигнала передатчика и других дискретных комбинационных составляющих в с.п.м. сигнала, по которой осуществляется расчет яркостной температуры.

Полученное значение средней яркостной температуры детонационного фронта на стационарном участке и погрешность ее измерения согласу-

ются со значениями, полученными с помощью известного алгоритма узкополосной фильтрации, что является подтверждением работоспособности предложенного метода.

Использование одинакового порядка а.р.-модели в соседних неперекрывающихся интервалах на протяжении всей длительности анализируемого сигнала значительно сокращает время расчета.

Метод цифровой обработки результатов с использованием а.р.-модели позволяет осуществлять фильтрацию узкополосного сигнала активного канала практически без потери чувствительности и может использоваться в качестве альтернативы методам, представленным в [2].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Богданов Е.Н., Иконников В.Н., Канаков В.А., Кашин А.В., Михайлов А.Л., Минеев К.В., Назаров А.В., Орехов Ю.И., Седов А.А., Хворостин В.Н.* // "Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны". Труды Международной конференции "XVII Харитоновские тематические научные чтения". Саров, 2015. С. 442.
2. *Ботов Е.В., Иконников В.Н., Канаков В.А., Корнев Н.С., Макарычев Н.А., Минеев К.В., Назаров А.В., Османов Р.Р., Седов А.А.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61. № 5. С. 432.  
<https://doi.org/10.1007/s11141-018-9899-y>
3. *Айвазян С.А., Мхитарян В.С.* Прикладная статистика и основы эконометрики. М.: ЮНИТИ, 1998. С. 820.
4. *Марпл С.Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. С. 252.
5. *Трусова А.Ю., Ильина А.И.* // Вестник СамГУ. 2013. № 7. С. 127.