

УДК 621.317.799

ИЗМЕРЕНИЕ ЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ПОМОЩЬЮ КВЧ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРА–РАДИОМЕТРА ПРИ НАЛИЧИИ СИГНАЛА АКТИВНОГО КАНАЛА

*Е. В. Ботов¹, В. Н. Иконников², В. А. Канаков², Н. С. Корнев³, Н. А. Макарычев³,
К. В. Минеев^{3*}, А. В. Назаров³, Р. Р. Османов³, А. А. Седов¹*

¹ Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров;

² Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского;

³ Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю. Е. Седакова, г. Нижний Новгород, Россия

Приведены результаты одновременного измерения яркостной температуры и перемещения детонационного фронта в образце тринитротолуола. Измерения проводились с помощью радиоинтерферометра–радиометра крайне высоких частот (КВЧ), разработанного в НИИИС им. Ю. Е. Седакова. Описаны алгоритмы и методика обработки регистрируемых сигналов.

ВВЕДЕНИЕ

Измерение параметров быстропротекающих газодинамических процессов является актуальной задачей для предприятий, занимающихся разработкой взрывчатых веществ. Наиболее важными параметрами газодинамических процессов считаются [1] скорость ударной волны, скорость детонационной волны и массовая скорость вещества. Наряду с измерением параметров движения фронтов ударно-волновых и детонационных процессов, чрезвычайно актуальной является задача определения основных термодинамических параметров состояния вещества — объёма, давления и температуры. Объём области пространства, охваченной газодинамическим процессом, может быть определён непосредственно по величине перемещения фронта этого процесса.

Давление во внутренних областях исследуемого вещества может быть оценено только косвенно по связи плотности вещества с его диэлектрической проницаемостью или взаимозависимости давления и температуры через уравнение состояния [2]. В настоящее время известен единственный метод дистанционного измерения температуры в радиодиапазоне — измерение яркостной температуры с помощью приёмного устройства с накоплением сигнала (радиометра). Чувствительность такого прибора зависит от ширины полосы частот регистрируемого сигнала и времени его накопления. При исследовании быстропротекающих процессов ввиду их крайне малой длительности (единицы микросекунд) необходимо использование радиометров с временем накопления не более 1 мкс. Спецификой активно-пассивного зондирования, проводящегося для получения синхронных данных об объёме (степени сжатия) и температуре ударно-сжатого вещества, является наличие достаточно мощной узкополосной помехи со стороны передатчика активного канала на входе приёмника радиометрического канала, ограничивающей реальную чувствительность последнего. В статье [3] предложен метод одновременного измерения параметров движения и тепловых характеристик быстропротекающих процессов с помощью радиоинтерферометра–радиометра КВЧ диапазона.

* mineevkv@gmail.com

В данной статье приводятся результаты измерения яркостной температуры и перемещения детонационного фронта, распространяющегося в образце тринитротолуола (ТНТ), с помощью КВЧ радиоинтерферометра—радиометра, разработанного в НИИИС им. Ю. Е. Седакова. Газодинамический эксперимент проводился на базе Института экспериментальной газодинамики и физики взрыва РФЯЦ—ВНИИЭФ. Методика обработки результатов измерений разработана совместно сотрудниками НИИИС им. Ю. Е. Седакова и ННГУ им. Н. И. Лобачевского.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эскиз экспериментальной сборки представлен на рис. 1. В качестве объекта исследования использовалась цилиндрическая пашка ТНТ с диаметром 120 мм и высотой 40 мм. Плоский детонационный фронт инициировался линзой из взрывчатого материала. Для устранения действия импульсной помехи от электродетонатора на измерительную аппаратуру применялась линия задержки из детонирующего прутка ПТ-83. Для предотвращения регистрации теплового сигнала от элементов сборки, находящихся перед пашкой, между линзой и пашкой располагалась экранирующая алюминиевая фольга.

Схема эксперимента изображена на рис. 2. Блок супергетеродинного приёмопередатчика радиоинтерферометра—радиометра 2 формирует на своём выходе зондирующее излучение с частотой $f = 93,7$ ГГц, которое подаётся на боковое плечо 10-децибелльного направленного ответви-

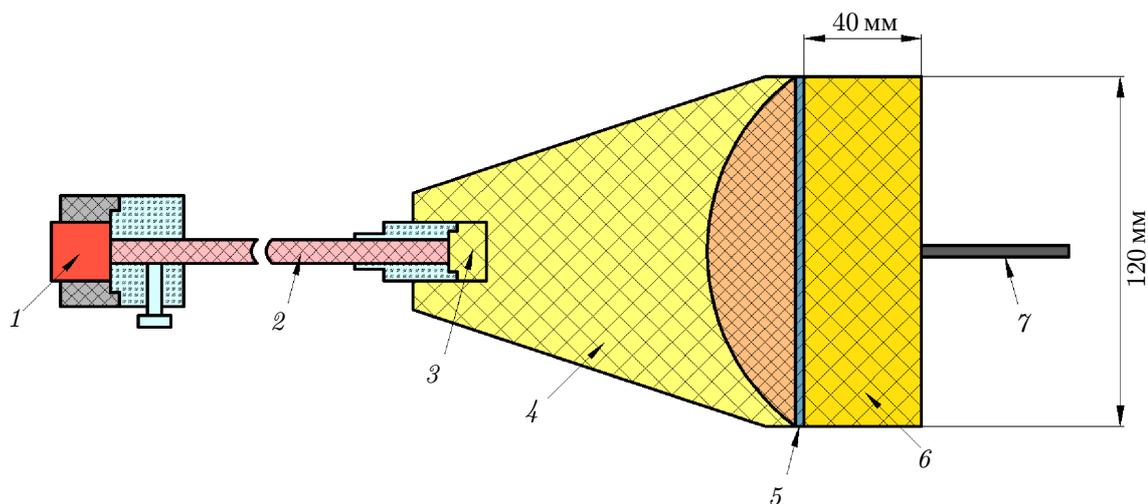


Рис. 1. Эскиз экспериментальной сборки: 1 — электродетонатор, 2 — пруток из ПТ-83, 3 — промежуточный детонатор, 4 — генератор плоской волны (линза), 5 — алюминиевая фольга, 6 — пашка ТНТ, 7 — антенная система

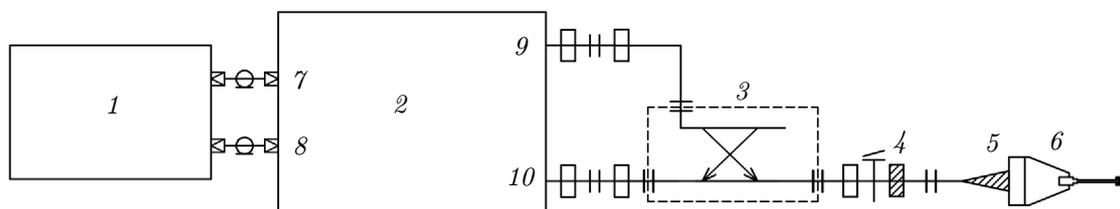


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 — цифровой осциллограф, 2 — блок приёмопередатчика, 3 — направленный ответвитель, 4 — фидерная система, 5 — приёмопередающая антенна, 6 — экспериментальная сборка, 7 — опорный сигнал промежуточной частоты, 8 — информационный сигнал промежуточной частоты, 9 — выход, 10 — вход

теля 3 и затем, после прохождения через фидерную систему 4, излучается приёмопередающей антенной 5. Фидерная система представляет собой прямоугольный диэлектрический волновод с длиной около 2 м и сечением 1×2 мм, выполненный из фторопласта, с погонным затуханием порядка 2,5 дБ/м. В качестве приёмопередающей антенны 5 используется торец прямоугольного диэлектрического волновода 4, который вводится в непосредственный контакт с экспериментальной сборкой 6. Отражённое от исследуемого объекта зондирующее излучение вместе с его собственным тепловым излучением поступает на вход приёмника через ту же антенну и фидерную систему. На выходе приёмника формируются опорный сигнал промежуточной частоты гетеродина (ПЧГ), являющийся комбинацией зондирующих колебаний непосредственно с выхода передатчика и колебаний гетеродина приёмника, и информационный сигнал промежуточной частоты (ПЧС), являющийся комбинацией принятых приёмником колебаний и колебаний того же гетеродина. Во время эксперимента цифровой осциллограф 1 регистрирует сигналы ПЧГ и ПЧС. Промежуточная частота составляет $f_{\text{ПЧ}} = 1\,200$ МГц.

Непосредственно перед началом измерений на экспериментальной площадке осуществляется калибровка радиометрического канала по эталонному источнику шумовой температуры. Вместо приёмопередающей антенны 5 (см. рис. 2) устанавливается широкополосный генератор квазибелого (в рабочей полосе частот радиометра) шума. Регистрируются сигналы включённого генератора шума и согласованной нагрузки, находящейся при температуре окружающей среды, после чего по этим сигналам рассчитываются калибровочные постоянные. Важно отметить, что калибровочные постоянные радиометрического канала являются функциями амплитуды отражённого от объекта и принятого приёмником сигнала передатчика. В связи с тем, что эта амплитуда заранее неизвестна и изменяется в процессе измерений, необходимо проводить калибровку радиометрического канала при различных уровнях зондирующего сигнала по методике, описанной в статье [4].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

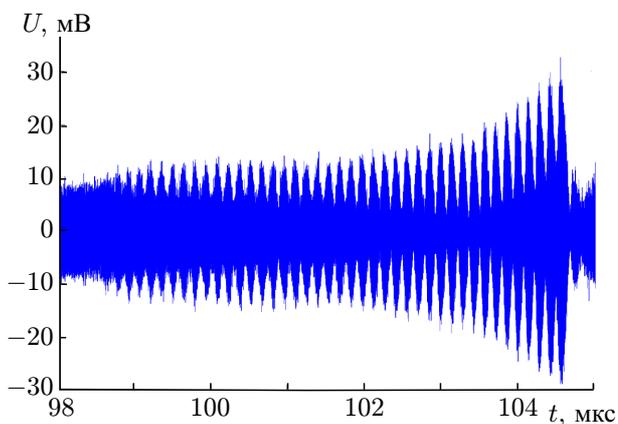


Рис. 3. Осциллограмма сигнала ПЧС: U — напряжение, t — время

Осциллограмма зарегистрированного приёмником сигнала ПЧС представлена на рис. 3. Сигнал регистрировался цифровым осциллографом с частотой дискретизации 5 ГГц. Хорошо заметные на рисунке биения сигнала ПЧС являются следствием интерференции колебаний, поступающих на вход приёмника от передатчика через направленный ответвитель и отражённых от области контакта антенны с исследуемым образцом, и колебаний, отражённых от движущегося фронта детонации в экспериментальной сборке.

Из рис. 3 видно, что детонация в шашке ТНТ начинается в момент времени $t_s = 98,5$ мкс, а выход её фронта на поверхность образца происходит в момент времени $t_f = 104,5$ мкс.

Для расчёта перемещения Δx детонационного фронта при отложенной цифровой обработке сигналов программно выполняется синхронное детектирование сигнала ПЧС по опорному сигналу ПЧГ, формируются два квадратурных сигнала (интерферограмма), по которым строится годограф. Изменение $\Delta\psi$ углового положения радиус-вектора годографа (изменение полной фазы интерферограммы между смежными отсчётами, отстоящими друг от друга по времени на

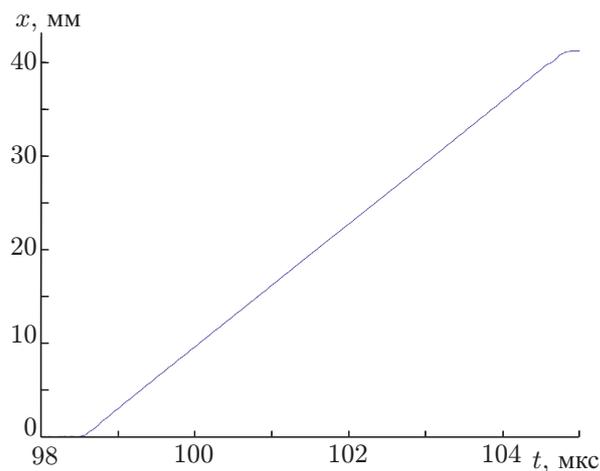
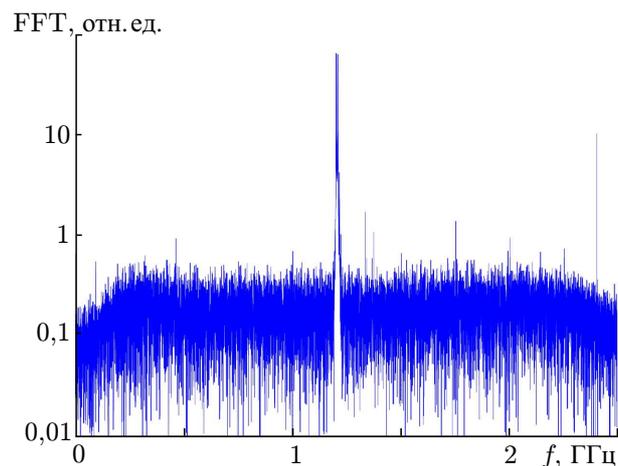


Рис. 4. График зависимости перемещения детонационного фронта от времени

Рис. 5. Амплитудный спектр сигнала FFT(f)

величину Δt) несёт информацию о перемещении объекта за это время:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{4\pi\sqrt{\varepsilon}} \Delta\psi, \quad (1)$$

где λ — длина волны зондирующего излучения в свободном пространстве, ε — диэлектрическая проницаемость среды, в которой движется отражающая поверхность.

Если интерферограмма содержит единственную спектральную компоненту ненулевой частоты на фоне аддитивного гауссова шума, то алгоритм определения перемещения исследуемого объекта по квадратурным сигналам обеспечивает получение его адекватной оценки по измеренным значениям текущей фазы интерферограммы при известной длине волны зондирующего излучения в исследуемой среде.

На рис. 4 представлен график перемещения x детонационного фронта в пашке ТНТ от времени. Линейная зависимость этого перемещения от времени однозначно определяет постоянную скорость детонации и говорит о высокой однородности пашки ТНТ и стационарном режиме детонации. При $x = 40$ мм линейная зависимость нарушается, что соответствует выходу фронта на поверхность образца. Полученный результат измерения полного перемещения фронта детонации практически точно совпадает с высотой пашки ТНТ. Скорость перемещения фронта в исследуемом образце ТНТ равна $v = (6\,600 \pm 100)$ м/с.

Для получения радиометрических данных (зависимости яркостной температуры от времени) из зарегистрированного сигнала ПЧС необходимо выделить слабый широкополосный сигнал теплового шума, излучаемого газодинамическим объектом, на фоне сильного узкополосного сигнала передатчика радиоинтерферометра–радиометра. В данном случае для оценки параметров широкополосного сигнала использовать методику обработки зарегистрированных сигналов во временной области, описанную в статье [5], не представляется возможным из-за наличия большого отражённого сигнала, маскирующего полезный шумовой сигнал. Для выделения слабого шумового сигнала необходимо перейти в частотную область и исключить из спектра принятого сигнала компоненты отражённого сигнала.

На рис. 5 представлен амплитудный спектр участка сигнала ПЧС, соответствующего интервалу времени от $t_s = 98,5$ мкс до $t_f = 104,5$ мкс, вычисленный с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье. Наибольшими амплитудами обладают гармоники с частотами $f_{\text{IFS}} = 1\,207$ МГц и $f_{\text{IF}} = 1\,200$ МГц. Они соответствуют сигналу, отражённому от движущегося де-

тонационного фронта, и сумме двух сигналов — поступающего через направленный ответвитель и отражённого от неподвижного переднего торца сборки. Кроме этого, в спектре сигнала присутствуют несколько дискретных комбинационных компонент с амплитудами, в несколько раз превышающими средний уровень (экспериментально установлено, что число таких компонент не более 30). Данные дискретные компоненты также необходимо исключить.

Первоначально был реализован следующий порядок отложенной цифровой обработки сигналов. На первом её этапе в каждом микросекундном интервале калибровочных сигналов, зарегистрированных перед экспериментом, проводится линейная фильтрация: все спектральные компоненты вне аппаратно определённого и пригодного для измерения мощности внешнего шума диапазона частот от 0,7 до 2,2 ГГц приравниваются к нулю, затем проводится нелинейная фильтрация — в рабочей полосе частот радиометрического канала от 0,7 до 2,2 ГГц пятьдесят самых мощных спектральных компонент (данное число спектральных компонент взято с небольшим запасом) приравниваются нулю.

Информационный сигнал ПЧС подвергается фильтрации в соответствии с тем же алгоритмом, что и калибровочные сигналы. Далее, на втором этапе обработки, в скользящем окне для каждого i -го микросекундного интервала сигнала ПЧС вычисляются средние значения m_{xi} квадратов амплитуд оставшихся спектральных составляющих, пропорциональные мощности шумового широкополосного сигнала на данном интервале времени.

Яркостная температура фронта исследуемого процесса определяется по формуле

$$T_{BR_i} = \alpha m_{xi} - \beta, \quad (2)$$

где i — номер временного интервала, α и β — постоянные величины, определяемые из обработки калибровочных сигналов (калибровочные постоянные).

График зависимости яркостной температуры от времени, полученный с применением нелинейной фильтрации, представлен на рис. 6, где левая и правая вертикальные линии соответствуют моментам времени t_s и t_f . Согласно рис. 6, 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 образца, наблюдается резкий рост яркостной температуры. На всём интервале распространения детонации в образце ТНТ не наблюдается участка, соответствующего стационарной детонации с постоянной измеренной яркостной температурой. Большие осцилляции яркостной температуры объясняются проявлением эффекта Гиббса, имеющего место при нелинейной фильтрации (приравнивании мощных дискретных спектральных компонент к нулю). При приближении фронта детонации к поверхности образца одновременно с ростом амплитуды активной составляющей сигнала увеличиваются кажущийся общий уровень яркостной температуры и амплитуда осцилляций, что не соответствует стационарному режиму детонации и требует усовершенствования рассмотренного метода обработки сигналов радиointерферометра–радиометра.

Было сделано предположение о том, что при реализации алгоритма нелинейной фильтрации по описанной выше методике в спектре шумового сигнала остаётся значительное число спектральных компонент среднего уровня, связанных с узкополосным сигналом. Поэтому был предложен альтернативный метод выделения шумового сигнала, основанный на использовании узкополосной избирательной фильтрации с последующим переходом в частотную область. На первом этапе, после определения частот мощных дискретных компонент в спектре принятого сигнала, цифровым режекторным фильтром с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтром) Баттерворта с полосой заграждения 5 МГц подавляются отражённый от движущегося детонационного фронта сигнал с частотой $f_{IFS} = 1\,207$ МГц, а также отражённый от неподвижного пе-

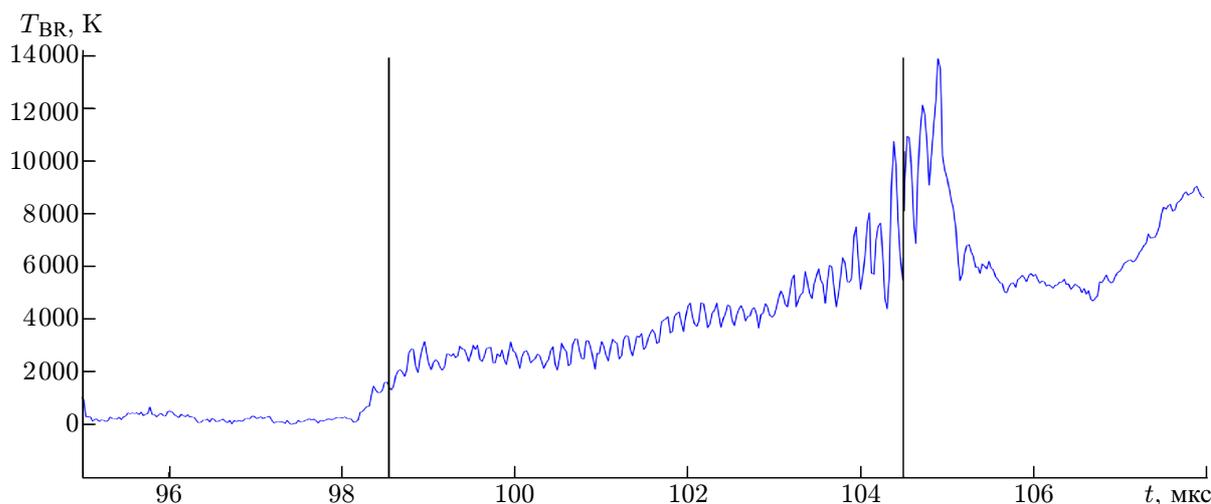


Рис. 6. График зависимости яркостной температуры от времени, полученный с применением нелинейной фильтрации

реднего торца установки сигнал с частотой $f_{IF} = 1200$ МГц. Затем аналогичным режекторным БИХ-фильтром Баттерворта с полосой заграждения 1 МГц подавляются частотные полосы со спектральными компонентами, в несколько раз превышающими средний уровень (экспериментально установлено, что число таких частотных полос не должно превышать 10). В результате получается сигнал, который эквивалентен сигналу, регистрируемому при пассивных радиометрических измерениях, когда передатчик отключён [5]. Калибровочные сигналы, зарегистрированные перед экспериментом, подвергаются фильтрации в соответствии с тем же алгоритмом, что и сигнал ПЧС.

Далее, в скользящем окне проводится процедура, аналогичная частотной обработке по первоначально предложенному алгоритму: на каждом интервале с длительностью 0,8 мкс вычисляются значения m_{xi} , пропорциональные мощности сигнала на данном интервале. Яркостная температура фронта исследуемого процесса определяется по формуле (2).

График зависимости яркостной температуры от времени, полученный с применением избирательной фильтрации, представлен на рис. 7 (кривая 1). Для сравнения на рис. 7 также показан график яркостной температуры как функции времени, полученный при пассивных измерениях в контрольном эксперименте с отключением передатчика (кривая 2). Обработка сигнала ПЧС в пассивном режиме проводилась во временной области [5]. В обоих случаях в качестве объекта исследования использовалась пашка ТНТ с диаметром 120 мм и высотой 40 мм.

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 образца, наблюдается рост яркостной температуры и затем стационарный участок. При этом радиометр фиксирует стабильную яркостную температуру фронта детонации в объёме взрывчатого вещества. Средняя яркостная температура детонационного фронта составляет $T_{BR} = (2156 \pm 354)$ К. С момента времени $t = 104$ мкс начинается резкий рост яркостной температуры, обусловленный выходом фронта детонации на поверхность образца и ударным разогревом прилегающего к нему воздуха. При этом происходит разрушение антенно-фидерной системы.

Сравнение кривых 1 и 2 на рис. 7 показывает, что на интервале, соответствующем детонации в образце ТНТ, в обоих случаях наблюдаются стационарные участки. Расхождение кривых

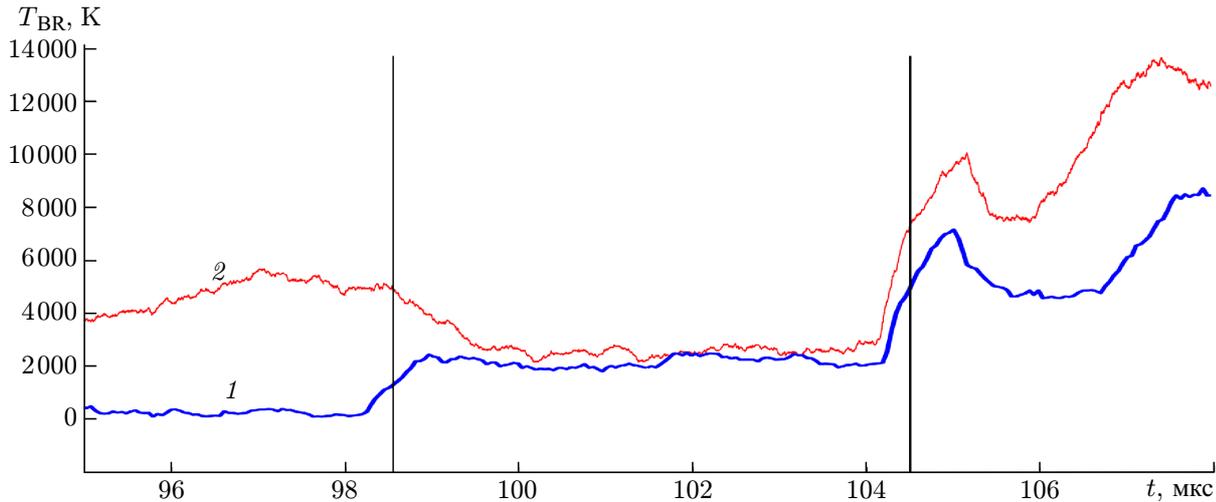


Рис. 7. Графики зависимостей яркостной температуры от времени, полученные с применением избирательной фильтрации (кривая 1) и при пассивных измерениях (2)

в окрестности момента времени $t_s = 98,5$ мкс, соответствующего входу фронта детонации в образец ТНТ, обусловлено отсутствием в случае пассивных измерений металлизированной алюминиевой фольги, которая экранирует тепловое излучение процессов, протекающих в линзе. Средняя яркостная температура детонационного фронта ТНТ, зарегистрированная при пассивных измерениях, составила $T_{BR} = (2532 \pm 397)$ К. Полученное значение с учётом погрешностей совпадает со средней яркостной температурой детонационного фронта в ТНТ, зарегистрированной при наличии сигнала активного канала, что позволяет судить о возможности применения метода избирательной фильтрации при обработке результатов измерений, полученных при работающем передатчике КВЧ радиоинтерферометра-радиометра.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты являются экспериментальным подтверждением реализуемости предложенного метода одновременного измерения параметров движения и тепловых характеристик быстропротекающих процессов с помощью радиоинтерферометра-радиометра КВЧ диапазона. Достигнутая погрешность измерения яркостной температуры фронта детонации конденсированного взрывчатого вещества определяется характеристиками приёмного устройства, в том числе потерями в фидерной системе, и составила $350 \div 400$ К при временном разрешении $0,8 \div 1,0$ мкс и полном сохранении метрологических характеристик интерферометра как средства измерения перемещений. Существенным обстоятельством, определяющим эффективность разделения сигналов активного и пассивного каналов по форме частотного спектра, является алгоритм нелинейной фильтрации принятого суммарного сигнала. Калибровочные постоянные радиометрического канала являются функциями амплитуды отражённого от объекта и принятого приёмником сигнала передатчика, в связи с чем необходимо проводить калибровку радиометрического канала при различных уровнях зондирующего сигнала.

Важно отметить, что реализация активно-пассивного режима зондирования быстропротекающих газодинамических процессов с помощью КВЧ радиоинтерферометра-радиометра при наличии металлического зеркала (алюминиевой фольги) на дальнем по отношению к антенне торце образца исследуемого вещества позволяет использовать активный канал не только для измерения перемещения фронта процесса (фазовые измерения), но и для измерения коэффициента

отражения от него излучения (амплитудные измерения). Синхронные измерения яркостной температуры и коэффициента отражения фронта в общем диапазоне частот позволяют получить оценку его термодинамической температуры как функции времени или его текущей координаты в толще исследуемого образца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фортов Е. В., Альтшулер Л. В., Трунина Р. Ф., Фунтикова А. И. Ударные волны и экстремальные состояния вещества. М.: Наука, 2000. 425 с.
2. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений М.: Наука, 1966. 686 с.
3. Ботов Е. В., Иконников В. Н., Корнев Н. С. и др. // Труды XXIII Международной научно-техн. конф. «Информационные системы и технологии (ИСТ-2017)», 21 апреля 2017 г., г. Нижний Новгород. С. 1160.
4. Иконников В. Н., Канаков В. А., Савельев Д. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 2. С. 124.
5. Богданов Е. Н., Иконников В. Н., Канаков В. А. и др. // Труды Международной конф. «XVII Харитоновские тематические научные чтения», 23–27 марта 2015 г., г. Саров. С. 442.

Поступила в редакцию 3 апреля 2018 г.; принята в печать 29 мая 2018 г.

MEASUREMENT OF THE BRIGHTNESS TEMPERATURE OF THE FAST GAS-DYNAMICS PROCESSES USING THE EHF RADIOINTERFEROMETER RADIOMETER IN THE PRESENCE OF ACTIVE-CHANNEL SIGNAL

*Ye. V. Botov, V. N. Ikonnikov, V. A. Kanakov, N. S. Kornev, N. A. Makarychev, K. V. Mineev,
A. V. Nazarov, R. R. Osmanov, and A. A. Sedov*

We show the results of simultaneous measurements of the brightness temperature and the detonation-front motion in a trinitrotoluene sample. The measurements were performed using the EHF radiointerferometer radiometer developed at Yu. E. Sedakov Research Institute of Measurement Systems. The algorithms and the methods for the recorded-signal processing are described.