

РАДИОФИЗИКА

УДК 53.082.54

ОБРАБОТКА ДАННЫХ МИЛЛИМЕТРОВОЙ МНОГОМОДОВОЙ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЕТОНАЦИИ ПЛОСКОГО СЛОЯ

© 2008 г.

*В.А. Канаков¹, В.В. Пархачёв¹, А.В. Родионов²*¹ Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского² Институт физики взрыва РФЯЦ-ВНИИЭФ

vvp111@mail.ru

Поступила в редакцию 16.06.2008

Рассматривается содержание радиоинтерферометрического подхода к зондированию быстропротекающих процессов, на примере детонации взрывчатого вещества в форме плоского слоя указываются преимущества многомодового подхода к анализу интерферометрических данных по сравнению с одномодовым.

Ключевые слова: радиоинтерферометрия, измерение скорости, газодинамические процессы.

Введение

Измерение параметров быстропротекающих газодинамических процессов является неизменно актуальной задачей на протяжении нескольких последних десятилетий. Методики таких измерений непрерывно совершенствуются. Наиболее интересными параметрами указанных процессов считаются: скорость ударной волны, скорость детонационной волны, массовая скорость вещества. Традиционным и чаще всего используемым методом измерения данных скоростей является контактный метод, когда на опытный образец вещества устанавливается несколько датчиков, а скорость определяется как отношение расстояния между соседними датчиками к разности времён прихода сигналов от датчиков. Обладая довольно высокой точностью, определяемой в основном погрешностью измерения расстояния между датчиками, контактный метод имеет ряд недостатков. Измерению подлежит только средняя скорость процесса, кроме того, сами датчики вносят искажения в объект исследования, т.к. непосредственно контактируют с ним. Причём увеличение количества датчиков не приводит к увеличению точности, из-за искажения от датчиков.

Альтернативой контактным датчикам является интерферометрический метод [1–4]. Измерения таким методом принципиально не вносят

изменений в объект исследования, а также позволяют непрерывно получать информацию о мгновенной скорости зондируемого объекта. Информативными параметрами интерферометрического метода, использующего электромагнитные колебания, могут являться фазовый сдвиг между падающей и отражённой или прошедшей волнами, доплеровский сдвиг отражённой или прошедшей волны, резонансная частота системы и т.п. Многообразие параметров, содержащих информацию об исследуемом объекте, позволяет выбрать в каждом конкретном случае оптимальный параметр и таким образом обеспечить эффективное техническое решение. Необходимым условием применимости метода является знание диэлектрической проницаемости (ϵ) среды распространения радиоволн. Обычно ϵ измеряют независимыми методами [5–7]. В этих работах отмечается, что достигнутые относительные погрешности измерений лежат в области 0.5–1%. Однако в ряде случаев [8, 9] ϵ может быть оценена интерферометрическим методом совместно со скоростью процесса.

Экспериментальная установка

Измерение скорости какого-либо процесса радиоинтерферометрическим методом заключается главным образом в определении разности частот зондирующего и отражённого от фронта

процесса сигналов. В случае зондирования свободного пространства с диэлектрической проницаемостью ϵ скорость процесса может быть получена из разности циклических частот сигналов Ω по формуле

$$V = \frac{\Omega\lambda}{4\pi\sqrt{\epsilon}}, \quad (1)$$

где λ – длина волны зондирующего излучения в вакууме.

Данная работа использует экспериментальные данные, полученные в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ. Схема экспериментальной установки (вид сверху) изображена на рис. 1. Целью проведения эксперимента было изучение поведения детонации в тонком слое. Для этого в плоском образце ВВ толщиной 1 мм, по форме напоминающем школьную линейку, с одного торца возбуждалась детонация. С другого торца в слой осуществлялся ввод зондирующего излучения от интерферометра через прямоугольный диэлектрический волновод, причём вектор напряжённости электрического поля E не имел перпендикулярной слою составляющей. Измеренная независимым методом диэлектрическая проницаемость ВВ составила 2.77 ± 0.01 . Интерферометр 3-миллиметрового диапазона длин волн, использованный в данном эксперименте, ранее уже продемонстрировал свою пригодность для проведения точных измерений параметров газодинамических процессов [4].

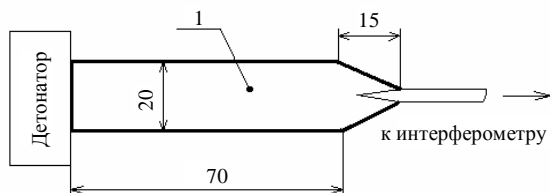


Рис. 1

Анализ экспериментальных данных

Внешний вид интерферограммы, полученной в описанном эксперименте, существенно отличался от идеально синусоидального, более напоминая биения довольно большой глубины. На первом этапе обработки результатов к сигналу была применена процедура оценки мгновенной частоты [10]. На основании данных о мгновенной частоте была оценена зависимость мгновенной скорости фронта детонации от времени. Среднее значение скорости составило $V_{\text{сред}} = 7678$ м/с, а стандартное отклонение $V_{\text{СКО}} = 1217$ м/с.

Данные значения были получены при допущении, что в «линейке» электромагнитное излучение распространяется только в форме ос-

новной H_0 -моды бесконечного плоского слоя с такой же толщиной, как у образца. Моды более высокого порядка не являются распространяющимися в столь тонком слое. Априорное предположение о том, что вторая основная E_0 -мода не была возбуждена с достаточной для наблюдения амплитудой, сделано на основании отсутствия во вводимом излучении компоненты напряжённости электрического поля, перпендикулярной плоскости слоя. Однако сложная структура интерферограммы позволяет предположить наличие в её спектре нескольких мод, которые и придают сигналу вид биений.

Дискретное преобразование Фурье интерферограммы, представленное на рис. 2 в виде непрерывного графика, имеет два выраженных максимума на разных частотах, что подкрепляет гипотезу о многомодовом характере распространения зондирующего излучения в слое. Следовательно, модель плоского слоя как волнующей структуры, заменяющей реальную «линейку» ВВ, оказывается не вполне точной. Было выдвинуто предложение рассмотреть образец как прямоугольный диэлектрический волновод, у которого одна сторона прямоугольного сечения много больше другой. Характеристическое уравнение такого волновода найдено, например в [11]. Направляемые моды в этом случае разделяются на HE_{ij} и EH_{ij} . Наличие последних полагаем несущественным в силу способа возбуждения. Малая толщина «линейки» определяет первый индекс HE -мод равным нулю. Получаем отсюда довольно большое количество HE_{0j} -мод, имеющих потенциальную возможность быть возбуждёнными в нашем прямоугольном волноводе. Спектр интерферограммы помимо двух главных максимумов имеет и другие составляющие с довольно большими значениями, но плохо разрешающиеся между собой («стол» левее максимумов на рис. 2).

Для оценки значения средней скорости и определения спектрального состава была реализована процедура, аналогичная описанной в [8]. Осуществлялся перебор возможных значений скорости, для каждого из которых строился теоретический спектр интерферограммы (рис. 2, дискретные компоненты), и находился коэффициент корреляции теоретического и экспериментального спектра. Значение скорости, при котором корреляция достигла максимума, было принято за оценку средней скорости детонационного процесса. Такая оценка составила $V_{\text{сред, мод}} = 7738$ м/с. Помимо этого, было получено, что два максимума в экспериментальном спектре соответствуют HE_{00} - и HE_{02} -модам. Малый коэффициент возбуждения HE_{01} -моды

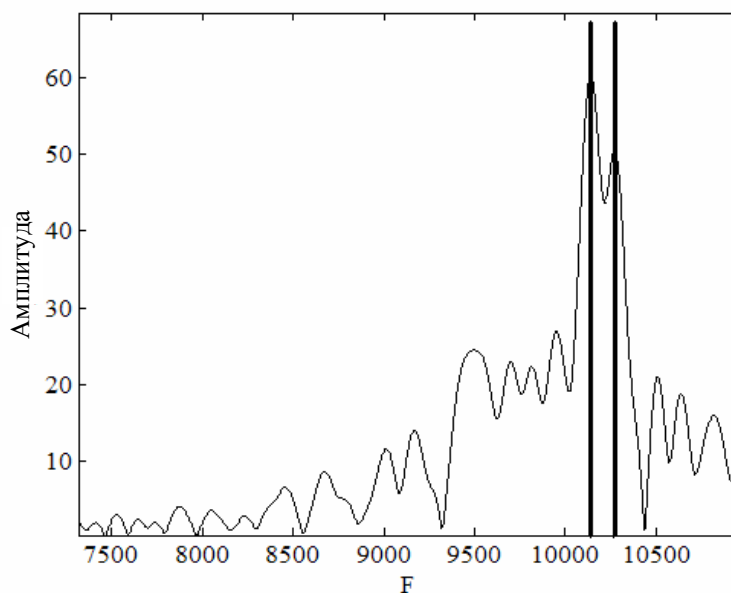


Рис. 2

легко объяснить тем, что она является нечётной, а у таких мод амплитуда поля E в середине волновода, где и происходит возбуждение, мала.

Аналогично [8] была выполнена оценка потенциальной точности указанного способа определения средней скорости. Для этого была использована функция корреляции экспериментального и теоретического спектров. Дисперсия оценки находилась по формуле

$$\sigma_V^2 = -\frac{N_0}{2E} R_{VV}''^{-1},$$

где $N_0/2$ – двусторонняя спектральная плотность мощности шума, E – энергия сигнала, а R – корреляционная функция. Производная бралась в максимуме R . Найденное значение СКО оценки $V_{\text{сред.мод}}$ составило $\sigma_V = 0.922$ м/с.

Однако даже априорная неопределённость данных независимых измерений ε величиной 0.01, как легко получить из (1), влечёт за собой погрешность в определении скорости не менее 14 м/с. Таким образом, видно, что основной причиной ошибки в радиоинтерферометрическом методе является погрешность определения параметров модели, и в первую очередь, измерения ε независимыми методами, а не низкая потенциальная точность метода.

Обсуждение результатов

Прежде всего, необходимо отметить довольно значительное различие оценок $V_{\text{сред}} = 7678$ м/с и $V_{\text{сред.мод}} = 7738$ м/с, полученных при одномодовом и многомодовом приближениях соответственно. Различие составило около

0.8%, что довольно существенно не только в сравнении с потенциальной точностью многомодового метода 0.01%, но и в сравнении с погрешностью, вносимой неопределённостью ε , порядка 0.2%. Спектр интерферограммы позволяет делать вывод о многомодовом характере распространения зондирующего излучения в образце. Поэтому результаты многомодового подхода представляются более обоснованными. К сожалению, из-за плохого разрешения мод в данном эксперименте одновременно с определением скорости не удалось произвести оценку ε . Другой трудностью метрологического самоконтроля является невозможность произвести измерения скорости с такой же точностью независимыми, например контактными методами.

Скорость распространения детонации в слое толщиной 1 мм по оценкам данной работы оказалась несколько ниже, чем скорость детонации в прутке из того же вещества диаметром 6 мм [4, 8]. Контактные датчики на прутке показали $V_{\text{сред.прут}} = 7818$ м/с. Различие с многомодовой оценкой в слое составило 1%. Возможным объяснением этого различия можно считать малую толщину слоя, близкую к предельной.

Можно заключить, что применение многомодового подхода к анализу интерферометрических данных, существенно повышает обоснованность получаемых результатов. Различие оценок, полученных одно- и многомодовыми методами указывает на более высокую точность последнего. Дополнительное повышение информативности многомодового метода возникнет при такой постановке эксперимента, когда волновые числа мод будут сильнее отличаться

друг от друга, и следовательно, моды будут лучше разрешаться на спектре интерферограммы. Повышение информативности может заключаться, например, в получении совместных оценок скорости процесса и ε взрывного вещества.

Список литературы

1. McCall G.H., Bongianni W.L., Miranda G.A. Microwave interferometer for shock wave, detonation, and material motion measurement // *Rev. Sci. Instrum.* 1985. V. 56. No. 8. P. 1612–1618.
2. Krall A.D., Glancy B.C., Sandusky H.W. Microwave interferometry of shock waves. 1. Unreacting porous media // *J. Appl. Phys.* Nov. 1993. V. 74. N. 10. P. 6322–6327.
3. Krall A.D., Glancy B.C., Sandusky H.W. Microwave interferometry of shock waves. 2. Reacting porous media // *J. Appl. Phys.* Nov. 1993. V. 74. N. 10. P. 6328–6334.
4. Михайлов А.Л., Костюков В.Е., Орехов Ю.И. и др. Некоторые результаты применения в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ радиоинтерферометров миллиметрового диапазона длин волн для изучения газодинамических процессов // Труды междунар. конф. «7 Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». 14–18 марта 2005. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С. 649–654.
5. Ma Z., Okamura S. Permittivity Determination Using Amplitudes of Transmission and reflection Coefficients at Microwave Frequency // *IEE Trans. on MTT.* May 1999. V. 47. No. 5. P. 546–550.
6. Afsar M.N., Tkachov I.I., Kocharyan K.N. A Novel W-Band Spectrometer for Dielectric Measurements // *IEEE Trans. on MTT.* December 2000. V. 48. No. 12. P. 2637–2642.
7. Geyer R.G., Kabos P., Baker-Jarvis J. Dielectric Sleeve Resonator Techniques for Microwave Complex Permittivity Evaluation // *IEEE Trans. on Instr. and Meas.* April 2002. V. 51. No. 2. P. 383–392.
8. Пархачёв В.В. Оценка параметров быстропротекающих процессов в диэлектрических структурах путём многомодового зондирования // Вестник ННГУ. Серия радиофизика. 2005. Вып. 1(3). С. 33–39.
9. Канаков В.А., Лупов С.Ю., Пархачёв В.В., Родионов А.В. Многомодовая радиоинтерферометрия как средство увеличения числа определяемых параметров ВВ // Труды междунар. конф. «9 Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». 12–16 марта 2007. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. С. 665–670.
10. Родионов А.В., Канаков В.А., Лупов С.Ю. Методы обработки результатов радиоинтерферометрических измерений параметров газодинамических процессов // Труды междунар. конф. «7 Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». 14–18 марта 2005. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С. 680–685.
11. Унгер Х.-Г. Планарные и волоконные оптические волноводы. М.: Мир, 1980. 656 с.

SIGNAL PROCESSING IN ACTIVE MULTIMODE EHF SOUNDING OF DYNAMIC PROCESSES IN A DIELECTRIC SLAB

V.A. Kanakov, V.V. Parkhachev, A.V. Rodionov

A radio interferometric approach has been considered to the sounding of fast processes using the example of dielectric slab explosive detonation. Some advantages of multi-mode vs single-mode signal processing of radio interferometric data have been pointed out.