

ИЗМЕРЕНИЕ СЛАБЫХ УДАРНЫХ ВОЛН В ВОЗДУХЕ ПРИ ПОМОЩИ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАХА-ЦЕНДЕРА

П.В. Юлдашев¹, М.М. Карзова², С. Оливьер³, Ф. Блан-Бенон³,
В.А. Хохлова²

¹*Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра общей физики и физики конденсированного
состояния. Россия, 119992, Москва, Ленинские горы
petr@acs366.phys.msu.ru*

²*Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра акустики
masha@acs366.phys.msu.ru*

³*Департамент Механики Жидкостей, Акустики и Энергетики, Высшая Инже-
нерная Школа Лиона, 36, ГИ де Коллонг, 69134 Экулли, Франция,
Philippe.Blanc-Benon@ec-lyon.fr*

В экспериментальной аэроакустике часто имеют дело с широкополосными акустическими импульсами большой амплитуды до нескольких тысяч Па. Так, например, ударные импульсы, генерируемые искровым источником, используются в лабораторных исследованиях, посвященных проблеме прохождения ударной волны от сверхзвукового самолета через приземный турбулентный слой атмосферы (звуковой удар) [1]. Широкополосные импульсы, создаваемые при фокусировке мощного лазерного излучения, применяются в архитектурной акустике при работе на миниатюризованных моделях улиц, залов и т.п. [2]. Во многих случаях амплитуда источника оказывается достаточной для того, чтобы за счет эффектов акустической нелинейности в волне сформировался ударный фронт [3].

Для измерения таких акустических импульсов в большинстве случаев используются широкополосные конденсаторные микрофоны. Примером может служить микрофон Briel & Kjaer 4138 1/8'', обладающий наиболее широкополосным откликом из всех представленных В&К микрофонов и их аналогов. Основная проблема при проведении измерений данными микрофонами заключается в ограниченности их частотного отклика. Так, микрофон 4138 1/8'' имеет резонанс в области 140-160 кГц и соответствующий спад отклика на высоких частотах. В задачах, где важно измерить характеристики ударного фронта, его структура оказывается заведомо сглаженной. Например, при амплитуде волны около 1000 Па ширина фронта составляет около 0.1-0.2 мкс, в то время как микрофон способен разрешать фронты с шириной не менее 2.5-3 мкс [3]. Кроме того, резонансный характер отклика микрофона приводит к появлению осцилляций на соответствующей частоте и затрудняет анализ сигналов.

Корректировка измеренных импульсов может быть проведена при помощи деконволюции, однако для этого необходимо знать АЧХ и ФЧХ

микрофона. Производитель, как правило, предоставляет только АЧХ. Таким образом, из вышеизложенного вытекает задача о калибровке широкополосных конденсаторных микрофонов и определения их полного частотного отклика. Данная задача может быть решена путем независимого измерения широкополосных акустических импульсов каким-либо альтернативным методом, обеспечивающим значительно более широкую полосу частот, чем тестируемый микрофон. Сравнение спектров двух сигналов, полученных с микрофона и в контрольном измерении, позволит найти частотный отклик.

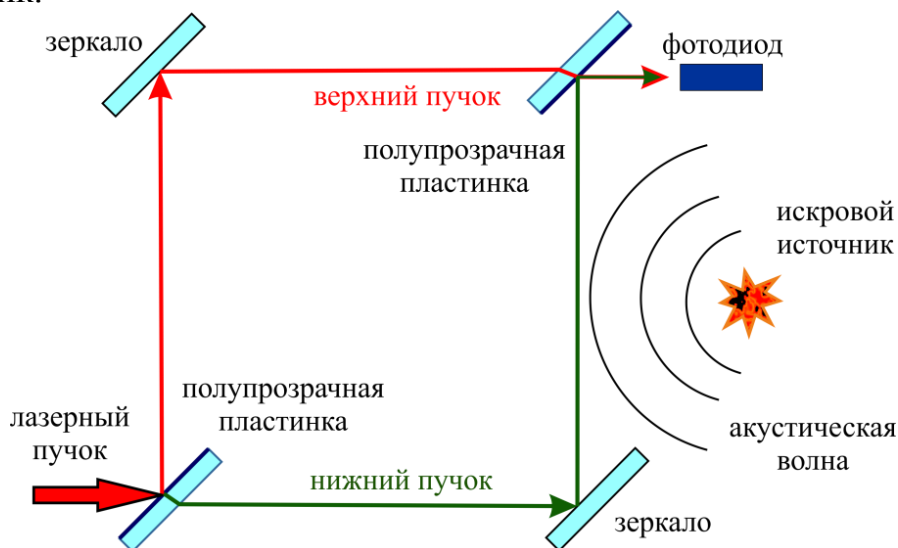


Рис. 1. Схема интерферометра Маха-Цендера.

Независимые измерения импульсов достаточно большой амплитуды могут быть выполнены при помощи оптических методов [4]. Так, для визуализации ударного фронта и измерения его ширины был использован оптический теневой метод [3]. Однако этот метод не обеспечивает достаточную чувствительность для наблюдения плавных участков профиля импульса. Более чувствительный шпирен-метод позволяет восстанавливать полный профиль волны, но при этом временное разрешение метода зависит от разрешения дорогостоящих высокоскоростных камер [5]. Более чувствительными и не требующими дорогостоящих датчиков являются интерференционные методы. Они часто применяются для исследования быстротекущих процессов в физике плазмы и взрыва [6].

В работе [7] были представлены экспериментальные данные измерений акустических импульсов при помощи интерферометра Маха-Цендера. Однако вопрос о восстановлении акустического профиля по оптическому сигналу не был проработан. В работе авторов [8] был проведен теоретический анализ процедуры восстановления профиля сферической волны. Анализ показал, что профиль ударных импульсов длительностью 50 мкс и амплитудой 100-1000 Па, которые характерны для искрового источника, восстанавливается с временным разрешением менее 1 мкс при ширине лазерного пучка около 100 мкм. Стоит отметить, что только наличие простой

симметрии волнового фронта (сферической) позволяет восстановить исходный профиль путем применения обратного преобразования Абеля [9].

В настоящей работе представлена экспериментальная установка, предназначенная для измерения акустических импульсов с помощью интерферометра Маха-Цендера. Схема установки показана на рис. 1. Интерферометр смонтирован на виброзащитном оптическом столе и состоит из источника непрерывного лазерного излучения ($\lambda = 632$ нм, He-Ne, 10 мВт), двух полупрозрачных пластинок и двух зеркал, расположенных под углом 45° к пучку. Для уменьшения сечения пучка в месте его взаимодействия с акустической волной использовались собирающие линзы, не показанные на схеме. Интерферометр работает в полосах бесконечной ширины, поэтому для регистрации сигналов используются фотодиоды. Фотодиод совместно с усиливающей электроникой обеспечивает линейную пропорциональность выходного сигнала световому потоку и широкополосный отклик от 0 до 10 МГц. Интерферометр дополнительно стабилизирован на низких частотах (0-10 Гц) путем управления положением одного из зеркал, смонтированного на пьезоэлектрическом устройстве, сигналом отрицательной обратной связи.

Измерения выполняются следующим образом. В отсутствие акустической волны интерферометр стабилизируется так, что выходной сигнал равен сумме интенсивностей верхнего и нижнего пучков: $I = I_1 + I_2$. При прохождении акустической волны через один из пучков вносится дополнительная фаза φ и интенсивность света на фотодиоде изменяется согласно формуле:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \sin \varphi. \quad (1)$$

В первом приближении фаза φ связана с возмущением показателя преломления воздуха n прямым преобразованием Абеля:

$$\varphi(R) = \frac{4\pi}{\lambda} \int_r^\infty \frac{n(r)rdr}{\sqrt{r^2 - R^2}}. \quad (2)$$

Восстанавливая фазу из оптического сигнала (1) и применяя обратное преобразование по отношению к преобразованию (2) восстанавливается возмущение показателя преломления. Акустическое давление вычисляется при помощи соотношения Глэдстона [10]: $p = n(c_0)^2/G$, где c_0 – скорость звука и $G = 0.000226$ м³/кг - константа Глэдстона при $\lambda = 632$ нм.

Пример измеренного профиля акустического импульса представлен на рис. 2. Данный профиль получен на расстоянии 15 см от искрового источника с зазором между электродами 2 см. Видно, что все детали импульса – передний и задний фронты, а также плавный переход между ними, хорошо отражены в измеренном сигнале. Ширина переднего ударного фронта составляет 0.4 мкс. Таким образом, временное разрешение представленного метода более чем в 5 раз превосходит разрешение наилучших конденса-

торных микрофонов. Кроме того, сигнал измеряется непосредственно в акустических единицах – Па, без проведения каких-либо дополнительных калибровок. Измерения на разных расстояниях от источника показали, что интерферометр хорошо работает в широком диапазоне амплитуд импульсов от 50 до 5000 Па. Таким образом, характеристики представленной экспериментальной установки позволяют использовать ее для проведения независимых измерений импульсов и выполнения калибровки стандартных микрофонов.

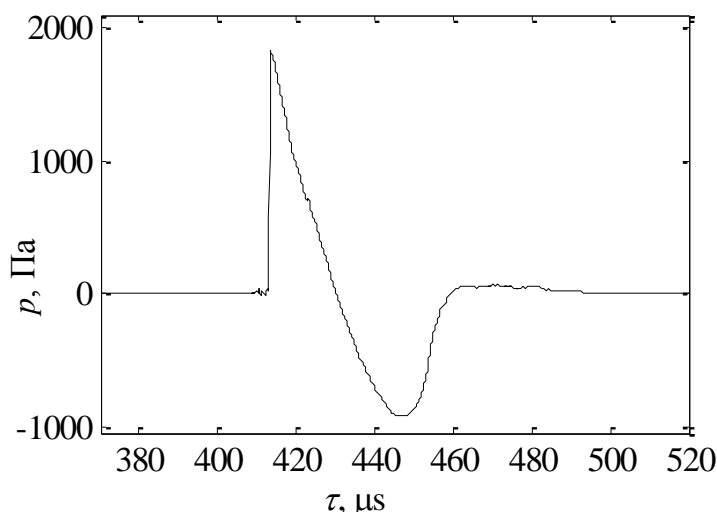


Рис. 2. Пример акустического импульса, измеренного на расстоянии 15 см от искрового источника

ЛИТЕРАТУРА

1. Averiyarov M., Ollivier S., Khokhlova V., Blanc-Benon P. // J. Acoust. Soc. Am. 130 (6), 2011, P. 3595-3607.
2. Bolanos J.G., Pulkki V., Karppinen P., Hæggstrom E. // J. Acoust. Soc. Am. 133 (4), 2013, EL221-EL227.
3. Yuldashev P., Ollivier S., Averiyarov M., Sapozhnikov O., Khokhlova V., Blanc-Benon P. // J. Acoust. Soc. Am., 2010, V. 128(6), P. 3321-3333.
4. Settles G. S. // Springer-Verlag, Heidelberg, 2001.
5. Karzova M., Salze E., Ollivier S., Castelain T., Andre B., Yuldashev P., Khokhlova V., Sapozhnikov O., Blanc-Benon P. // Proc. of the Acoustics 2012 Conference (Nantes, France), P. 1111-1115.
6. Климкин В.Ф., Папырин А.Н., Солоухин Р.И. // Новосибирск, «Наука», 1980.
7. Smeets G. // J. Acoust. Soc. Am. 1977. Vol. 61, no. 3. P. 872–875.
8. Yuldashev P., Averiyarov M., Khokhlova V., Sapozhnikov O., Ollivier S., Blanc-Benon P. // 10ème Congrès Français d'Acoustique, 12-16 avril 2010, Lyon, CD-ROM.

9. Alvarez R., Rodero A., Quintero M.C. //Spectrochimica Acta Part B, 2002. V. 57. P. 1665-1680.

10. Merzkirch W. //Academic Press, New York and London, 1974.