

СОЗДАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО МОНОПОЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ОТКЛИКОВ ПОМЕЩЕНИЙ

А.А. Белоус, А.В. Шанин, А.И. Корольков

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,

Физический факультет, г. Москва

Email: artem.belous@gmail.com

В настоящее время измерение импульсных откликов помещений является наиболее часто используемым способом получения структуры звуковых отражений, поскольку имея импульсный отклик и входной сигнал, можно вычислить выходной сигнал. Отдельным преимуществом этого способа является то, что для получения частотной характеристики линейной системы нужно только взять Фурье-преобразование от импульсного отклика. Целью данной работы является создание монопольного источника, способного стать альтернативой коммерческим решениям, для измерения таких откликов при помощи излучения псевдослучайных последовательностей максимальной длины.

Ключевые слова: импульсный отклик, частотная характеристика, монопольный источник

ВВЕДЕНИЕ

Импульсный отклик – наиболее информативная характеристика акустического рассеивателя, поскольку любой входной сигнал, свернутый с импульсным откликом, дает выходной сигнал. Обычно источниками для измерения такого отклика являются импульсные источники (пистолетный выстрел и др.), но есть возможность получить его при помощи монопольного источника, излучающего псевдослучайную последовательность максимальной длины (Maximum Length Sequence, MLS). Реализация такого источника и предлагается в данной работе. Кроме того, описывается метод восстановления импульсного отклика, относящегося к структуре рассеивателя и не связанного со структурой источника, при помощи измерения объемной скорости источника.

1. М-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ

М-последовательность представляет собой псевдослучайную периодическую двоичную последовательность, автокорреляционная функция которой близка к периодически повторяющемуся единичному импульсу. Последовательность $\{S_k = \pm 1\}$ порядка M имеет период $L = 2^M - 1$, а ее автокорреляционная функция $\{A_k\}$ имеет вид

$$A_k = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L S_n S_{n+k-1} = \begin{cases} 1, & k = 1; \\ -\frac{1}{L}, & k = 2 \dots L. \end{cases} \quad (1)$$

Благодаря этому свойству М-последовательность можно использовать для измерения импульсных откликов линейных стационарных систем. Если подать на вход системы сигнал в виде М-последовательности и вычислить взаимную корреляционную функцию выходного и входного сигналов, получится сигнал, представляющий собой отклик системы на автокорреляционную функцию М-последовательности. То есть сигнал, близкий к импульсному отклику системы [1].

Если $\{R_k\}$ – отклик системы на М-последовательность $\{S_k\}$, а $\{G_k\}$ – импульсный отклик системы, то $\{R_k\}$ есть свертка $\{S_k\}$ и $\{G_k\}$:

$$R_k = \sum_{n=1}^L S_{k-n} G_n, \quad (2)$$

а взаимная корреляция $\{H_k\}$ последовательностей $\{R_k\}$ и $\{S_k\}$ есть отклик системы на $\{A_k\}$:

$$H_k = \frac{1}{L} \sum_{m=1}^L S_m R_{k+m} = \frac{1}{L} \sum_{m=1}^L S_m \sum_{n=1}^L S_{k+m-n} G_n = \sum_{n=1}^L A_{k-n} G_n \approx G_k. \quad (3)$$

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

На вход системы подается М-последовательность $\{S_k^{in}\}$. Этот сигнал через ЦАП и усилитель подается на вход акустического источника. Микрофон располагается вблизи рассеивателя. Сигнал с микрофона усиливается и оцифровывается, потом вычисляется взаимнокорреляционная функция $\{H_k\}$ выходного и входного сигналов:

$$H_k = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L S_k^{in} S_{k+n}^{out} \quad (4)$$

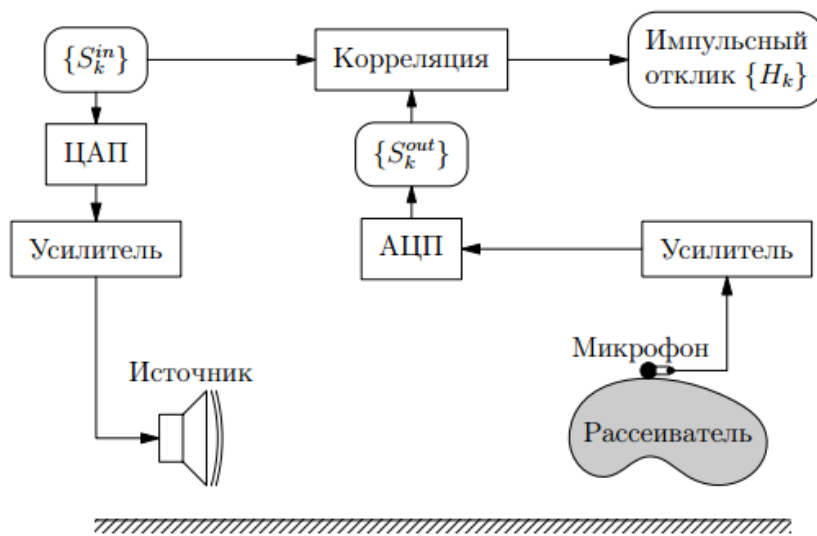


Рис. 1 Схема эксперимента с М-последовательностью [1]

Преимуществом этой экспериментальной техники также является то, что для ее использования не нужно безэховое помещение – полезный сигнал от рассеивателя появляется в импульсном отклике системы раньше, чем помехи от акустического окружения. Для надежного разделения полезного и паразитного сигналов следует располагать рассеиватель на достаточном удалении от пола и прочих предметов, а затем применять окно во временной области, отсекая паразитные сигналы.

3. МОНОПОЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК

Представленный источник представляет собой электродинамическую головку, помещенную в фанерный короб с прикрепленными к нему концентратором на узкое отверстие ($d = 36$ мм). Такой источник способен создавать поле, близкое к полю

точечного источника. Изготовленный источник является аналогом коммерческого решения фирмы Briel & Kjaer Omnisource.

К выходному отверстию источника на резьбу крепится адаптер, позволяющий измерять объемную скорость воздуха на выходе источника. Адаптер представляет собой металлическую трубку круглого сечения, внутрь которой помещены два микрофона. Сигналы с микрофонов используются для расчета объемной скорости источника. На трубку накручивается конусовидный обтекатель, чтобы избежать паразитных отражений от источника. Для измерения объемной скорости и для регистрации рассеянного поля используются одинаковые микрофоны Audix ТМ-1, имеющие рабочий диапазон 20 Гц – 20 кГц.

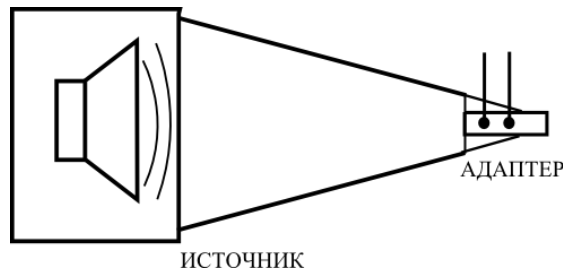


Рис. 2 Схема источника с адаптером для измерения объемной скорости

4. ВЫДЕЛЕНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ОТКЛИКА РАССЕЙВАТЕЛЯ

Сигнал с микрофона необходимо очистить, выделив импульсный отклик рассеивателя. Рассмотрим непрерывные сигналы $A(t)$ и $H(t)$. Введем следующие функции:

- $W(t)$ – производная объемной скорости источника по времени
- $H^{prop}(t)$ – импульсный отклик, описывающий распространение волны от источника до микрофона, определяется соотношением:

$$p(t) = \frac{\rho_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\tau) H^{prop}(t - \tau) d\tau, \quad (5)$$

где $p(t)$ – давление в точке наблюдения при подаче на вход системы сигнала $A(t)$, ρ_0 – плотность воздуха.

$$H(t) = \int_{-\infty}^{\infty} p(\tau) H^{recv}(t - \tau) d\tau. \quad (6)$$

- $H^{recv}(t)$ – импульсный отклик приемной части:

Нормировочный множитель $\rho_0/4\pi$ в формуле (5) вводится из следующих соображений. Известно, что в свободном пространстве монополярный источник создает поле, пропорциональное производной его объемной скорости по времени:

$$p = \frac{\rho_0}{4\pi R} W\left(t - \frac{R}{c}\right), \quad (7)$$

где R – расстояние до точки наблюдения.

То есть в этом случае $H^{prop}(t)$ представляет собой дельта-функцию:

$$H^{prop} = \frac{\delta(t - R/c)}{R}. \quad (8)$$

Дельта-функция обратно пропорциональна расстоянию до источника R и обращается в единицу при $R = 1$ м. Для наших сигналов будем иметь:

$$p_\omega = W_\omega H_\omega^{prop}; \quad (9)$$

$$H_\omega = p_\omega H_\omega^{recv}, \quad (10)$$

где индекс ω означает Фурье-образ соответствующего сигнала.

Дифракционную часть импульсного отклика можно восстановить, если измерить производную по времени от объемной скорости источника $W(t)$:

$$H_\omega^{prop} = \frac{H_\omega}{W_\omega H_\omega^{recv}}. \quad (11)$$

Длительность используемого в эксперименте сигнала (4) соответствует более чем 1 км пути, проходимого волной. При этом нас интересуют только первые несколько метров импульсного отклика, а вся остальная его часть является помехой. Чтобы ослабить влияние этой помехи, используем для вычисления Фурье-образов только начальную часть сигналов $H(t)$ и $W(t)$. Длительность этой начальной части берется такой, чтобы в нее попала вся существенно ненулевая часть сигнала $W(t)$.

5. ПРОИЗВОДНАЯ ОБЪЕМНОЙ СКОРОСТИ ИСТОЧНИКА

Для измерения объемной скорости источника используются два микрофона в адаптере (рис. 3).

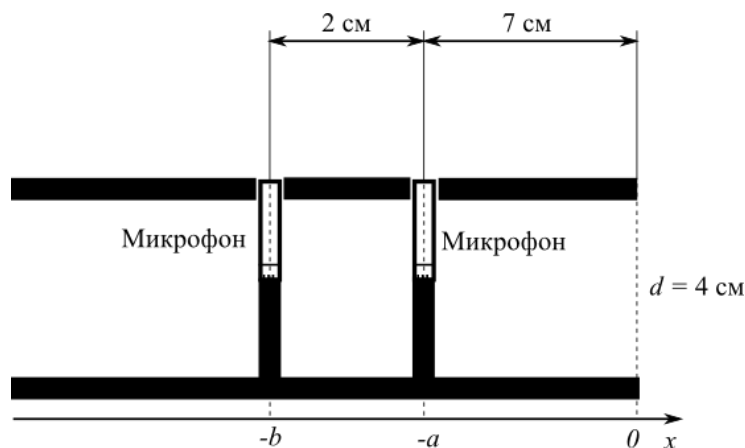


Рис. 3 Схема адаптера для измерения объемной скорости

Пусть при подаче на вход системы M -последовательности $\{S_k^{in}\}$ с микрофонов адаптера после усиления и ЦАП приходят сигналы $\{S_k^{out,1}\}$ и $\{S_k^{out,2}\}$. Пусть $\{H_k^{1,2}\}$ — взаимные корреляции этих сигналов с входным сигналом $\{S_k^{in}\}$. Обозначим через $p_{1,2}$ начальные части сигналов $H^{1,2}$.

Считая, что в адаптере распространяются только поршневые моды, запишем давление в трубке для каждой частоты [3]:

$$p_{\omega}(x) = Ae^{-ikx} + Be^{ikx} \quad (12)$$

где A и B - амплитуды волн, распространяющихся в положительном и отрицательном направлениях оси x соответственно. Предполагается гармоническая зависимость от времени $e^{i\omega t}$.

Микрофоны измеряют давления $p_1(t)$ и $p_2(t)$ в точках $x = -b$ и $x = -a$ соответственно. Их Фурье-образы:

$$\begin{aligned} p_{1\omega} &= Ae^{ikb} + Be^{-ikb}, \\ p_{2\omega} &= Ae^{ika} + Be^{-ika}, \end{aligned} \quad (13)$$

Откуда

$$A = \frac{-p_{1\omega}e^{ikb} + p_{2\omega}e^{ika}}{e^{2ika} - e^{2ikb}}; \quad B = \frac{p_{1\omega}e^{ik(2a+b)} - p_{2\omega}e^{ik(a+2b)}}{e^{2ika} - e^{2ikb}}. \quad (14)$$

Пользуясь уравнением Эйлера, получим:

$$\left(\frac{dv}{dt}\right)_{\omega} = \frac{ik}{\rho_0}(Ae^{-ikx} + Be^{ikx}) \quad (15)$$

Производная по времени объемной скорости источника:

$$W_{\omega} = i\omega \frac{\pi r^2}{\rho_0 c} (A - B) \quad (16)$$

где: r — радиус трубки адаптера. Полученная формула дает относительно неплохие результаты, однако вносит заметные фазовые искажения. Причиной этих искажений служит то, что трубка не является достаточно тонкой, а значит, ее конец нельзя считать точечным источником. Используя теорию Вайнштейна об излучении волн из открытого конца волновода, можно получить формулу, подходящую для данного случая. Для этого в (16) надо заменить B на $-A$, то есть

$$W_{\omega} = i\omega \frac{2\pi r^2 A}{\rho_0 c}. \quad (17)$$

Вычисленная таким образом объемная скорость будет содержать в себе также АЧХ приемных трактов адаптера. В действительности микрофоны в адаптере аналогичны микрофону, используемому для регистрации поля вблизи рассеивателя, а АЧХ усилителей в приемных трактах близки к идеальным (можно считать, что $H_{\omega}^{recv} = 1$). Формулу (11) можно переписать в виде:

$$H_{\omega} = W_{\omega} H_{\omega}^{prop}. \quad (18)$$

Очевидной трудностью является то, что формулы (14) имеют смысл только для частот $f < f_c = c_0/(2(b - a))$. Это частота, при которой знаменатель в (14) обращается в нуль. Таким образом, все сигналы при обработке должны быть пропущены через ФНЧ.

6. ПРОВЕРКА ИСТОЧНИКА НА ИЗМЕРЕНИИ В ПУСТОМ ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ

Простейшее акустическое окружение, легко реализуемое в эксперименте, - это пустое полупространство с жесткой границей. Давление в точке наблюдения в этом случае создается прямой волной и волной, отраженной от границы полупространства. Импульсный отклик H^{prop} имеет вид

$$H^{prop} = \frac{\delta(t - R/c)}{R} + \frac{\delta(t - R'/c)}{R'}, \quad (19)$$

где R и R' - расстояния от микрофона до источника и до отражения источника в границе полупространства соответственно.

Для проверки работоспособности построенной установки было проведено сравнение результатов аналогичных экспериментов, проведенных при помощи этой установки и установки из приборов фирмы Briel & Кјаег: источника звука Omnisource 4295 с адаптером объемной скорости 4299 и 1/4 дюймовых микрофонов 4957. Последняя установка показала себя как работоспособная и использовалась для измерений в других работах [1,2].

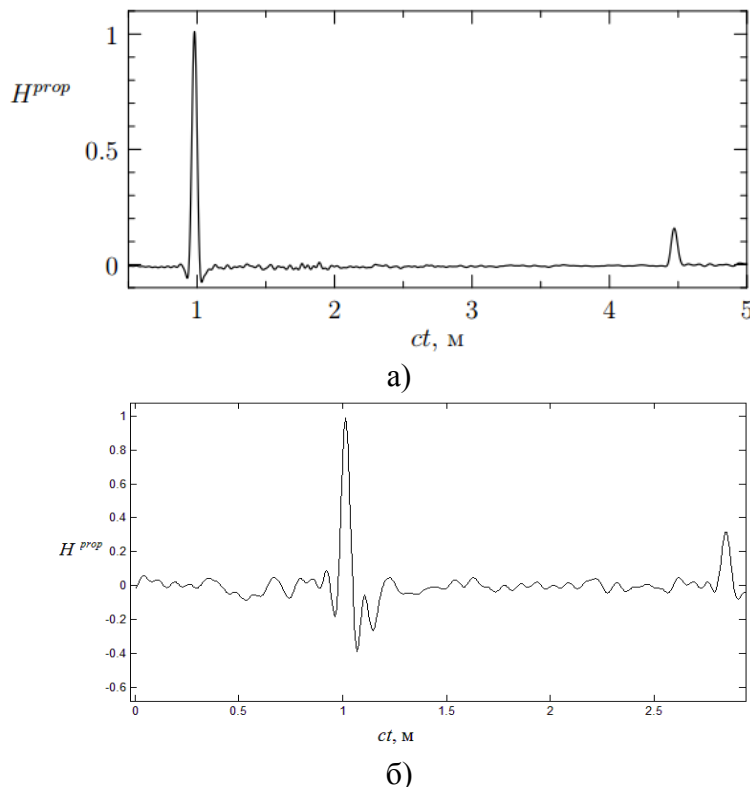


Рис. 4. Измеренный импульсный отклик пустого полупространства на установке Briel & Кјаег [1] (а) и на представленной установке (б).

Источник был расположен на расстоянии 1 м от микрофона на высоте 1,35 м от пола, и микрофон был максимально поднят над полом на стойке на 1,35 м. На графике

(Рис. 4, б) видны два пика, первый из которых соответствует прямому сигналу от источника, а второй – отражению от пола. Все окружающие предметы были удалены на такое расстояние, чтобы отраженные от них волны приходили на микрофон позже прямой и отраженной от пола волн.

Хорошо видно, что пики имеют правильные позиции по горизонтальной оси, а амплитуды соответствуют закону $1/r$. Небольшие пики вокруг первого большого пика – физические и соответствуют отражениям внутри источника и от микрофонов, стоящих в адаптере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена установка и описана техника дифракционного эксперимента при помощи М-последовательности. При одной и той же технике измерений и обработки данных результаты, полученные с помощью нового источника, практически идентичны результатам с коммерческой установки, за исключением паразитных пиков, связанных с не обтекаемой формой источника и отражениями внутри корпуса.

Работа поддержана грантом РФФИ 14-02-00573 и грантом НШ 7062.2016.2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валяев В.Ю. Экспериментальное и теоретическое исследование дифракции акустических волн на конусах специального вида и препятствиях типа полосы: Кандидатская диссертация / МГУ им. Ломоносова. 2011.
2. Валяев В. Ю., Шанин А. В. Экспериментальное изучение дифракции акустической волны на жестком цилиндре MLS-методом // Сборник трудов участников XII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах» («Волны-2010»). Звенигород: 2010. — Май. С. 53–54.
3. Исакович М. А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.
4. Paulo J. P., Martins C. R., Coelho J. B. A hybrid MLS technique for room impulse response estimation // Appl. Acoust. 2009. Vol. 70. Pp. 556–562.