

УДК 534.222

Савчук В.Н., Савчук Т.Л., д-р техн. наук Г.И. Сокол, Я.Д. Левченко

ГЕНЕРИРОВАНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ГАРМОНИК КАК СПЕКТРАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ АКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ

Разработан способ, позволяющий получить в заданной точке акустического поля колебания в виде последовательности импульсов predetermined профиля. Способ наиболее эффективен для воспроизведения кусочно-разрывных функций (последовательностей прямоугольных, треугольных и других импульсов). Реализация способа не зависит от типа акустических возбудителей в рамках линейной акустики. Генерирование колебания производится формированием вспомогательных гармонических колебаний с амплитудами, частотами и фазами, равными амплитудам, частотам и фазам – составляющим ряда Фурье.

Розроблено спосіб, що дозволяє отримати в заданій точці акустичного поля коливання у вигляді послідовності імпульсів визначеного наперед профілю. Спосіб є найбільш ефективним для відтворення кусково-розривних функцій (послідовностей прямокутних, трикутних та інших імпульсів). Реалізація способу не залежить від типу акустичних збуджувачів в рамках лінійної акустики. Генерування коливань здійснюється формуванням допоміжних гармонічних коливань з амплітудами, частотами і фазами, які дорівнюють амплітудам, частотам і фазам – складовим ряду Фур'є.

Developed the method that is allowing to obtain vibrations as a sequence of impulses of predetermined profile in a the specific point of the acoustic field. This method is the most effective for reproduction of piecewise discontinuous functions (sequences of rectangular, triangular and other impulses). Implementation of the method doesn't depend on type of acoustic exciter within the framework of linear acoustics. Generating of oscillations produced by formation of auxiliary harmonic oscillations with amplitude, frequency and phase that are equal to amplitude, frequency and phase as components of Fourier series.

Общеизвестно, что низкочастотные звуковые волны могут распространяться на большие расстояния и тем самым обеспечивать связь, звуковидение, телеметрию, подводную локацию, обнаружение различных биологических объектов. Часто требуется сформировать акустические колебания в виде отдельного импульса или последовательности из импульсов с заданными характеристиками.

Пути решения данной проблемы были частично представлены в некоторых научных работах. Nakamura Toshiaki, Nakamura Akir [1] разработали метод генерации синусоидальных звуковых импульсов конечной амплитуды синусоидальным звуком в свободном пространстве. В работе не определен качественный и количественный вклад отдельных составляющих.

Возбуждение акустических импульсов распределенными источниками, движущимися с трансзвуковой скоростью, описано у В.Э. Гусева и А.А. Карабутова [2]. Возбуждение импульса заданной формы и длительно генерируемого в определенной

точке пространства в данном случае проблематично.

Предложены способы получения звукового импульса в отдаленной точке акустического поля в линейной постановке задачи [3, 4]. Представленные способы отличаются сложностью исполнения. Например в способе, представленном Я.А. Кумченко, А.С. Бабицем, Н.И. Лукашенко, В.И. Спицким [4], генерирование колебания низкой частоты проводится формированием вспомогательных гармонических акустических колебаний разных частот в волновые пакеты. Способ обеспечивает генерирование, излучение, фокусирование и локализацию волн на заданном расстоянии. При этом частоты вспомогательных гармонических акустических колебаний больше частоты генерируемого звукового колебания, а протяженность каждого волнового пакета равна половине периода звукового колебания. Излучение волнового пакета осуществляется через половину периода звукового колебания низкой частоты. Формирование вспомогательных

гармонических акустических волн разных частот в волновые пакеты производится, например, посредством двух малогабаритных газоструйных излучателей с частотами 10 и 100 КГц. Недостатком предложенного метода является отсутствие возможности спрофилировать импульс любой формы.

Целью настоящей работы является осуществление генерирования низкочастотных гармоник, распространяющихся на большие расстояния почти без затухания, как составляющих последовательности акустических импульсов любой заданной формы.

Задача решается таким путем: сначала осуществляется генерирование последовательности импульсов. Последовательность производят формированием вспомогательных гармонических колебаний с амплитудами A , частотами f и фазами φ , равными амплитудам, частотам и фазам составляющих ряда Фурье ($f = \omega / 2\pi$, ω – круговая частота), а затем в дальнем акустическом поле на большом расстоянии от акустической системы распространяются низкочастотные составляющие спектра, затухание которых обычно мало.

Необходимо разработать способ, позволяющий получить в заданной точке акустического поля импульс и последовательность импульсов predeterminedного профиля [5] и устройство, осуществляющее способ.

Предполагается, что каждый из излучателей имеет хорошо отработанную на практике конструктивную схему, например, типа громкоговорителя, а управление системой электрически отличается быстродействием и является простым в эксплуатации и легко осуществимым.

Предпосылкой для создания способа стала низкая эффективность генерирования низкочастотных акустических колебаний с помощью отдельного излучателя. Отличительной особенностью единичных излучателей низких частот является малая активная составляющая акустической мощности. Осуществить проектирование излучателя с параметром $kR \gg 1$ (k – волновое число, R – радиус излучателя) слож-

но [3, 4]. Сферичность фронта низкочастотного акустического поля предполагает значительное уменьшение уровня звукового давления с расстоянием по гиперболическому закону, что представляет собой снижение на значительную величину.

Интерес представляет формирование последовательности импульсов такой формы, чтобы они были насыщены низкочастотными составляющими.

Процесс формирования повторяющегося импульса заданной формы в определенной точке акустического поля является типичным периодическим колебательным процессом. Общее математическое выражение периодического процесса задают функцией $f(t)$ от времени t , имеющей свойство повторять свое значение через интервалы, равные периоду T . Это свойство выражают в форме соотношения [6]

$$f(t) = f(t + T). \quad (1)$$

Считается, что если периодическая функция с периодом T в интервале $t, t+T$ имеет конечное число максимумов и минимумов, а в точках разрывов удовлетворяет условию Дирихле

$$f(t) = \frac{f(t-0) + f(t+0)}{2},$$

то она может быть представлена в виде ряда Фурье [7, 8]

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} \left(B_m \cos \frac{2m\pi t}{T} + C_m \sin \frac{2m\pi t}{T} \right), \quad (2)$$

где m — номер гармоники; A_0, B_m, C_m — коэффициенты ряда, которые вычисляют согласно выражениям [7, 8]

$$A_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt; \quad B_m = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos \frac{2m\pi t}{T} dt; \\ C_m = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin \frac{2m\pi t}{T} dt. \quad (3)$$

Ряд Фурье (3) часто записывают в форме [8]

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos \left(\frac{2m\pi t}{T} - \alpha_m \right), \quad (4)$$

где α_m — фаза.

В качестве примера проведем разложение в ряд Фурье последовательности из прямоугольных импульсов (рис. 1) с периодом T и длительностью импульса T/n ($n > 1$). Пусть последовательность задана функцией

$$f(t) = \begin{cases} h & \text{при } lT \leq t \leq lT + T/n, \\ 0 & \text{при } lT + T/n < t < (l+1)T, \end{cases}$$

где $l = 0, 1, 2, \dots$; h — амплитуда импульса.

Вычислив A_0 , B_m и C_m согласно (3), получим:

$$A_0 = \frac{2h}{n}; \quad B_m = \frac{h}{m\pi} \sin \frac{2m\pi}{n}; \quad C_m = \frac{h}{m\pi} \left(1 - \cos \frac{2m\pi}{n} \right).$$

Из данных выражений определяем амплитуды и фазы отдельных гармонических составляющих:

$$A_m = \frac{2h}{m\pi} \sin \frac{m\pi}{n}, \quad \alpha_m = \frac{m\pi}{n}.$$

Тогда для данной периодической функции ряд Фурье имеет вид:

$$f(t) = \frac{h}{n} + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{2h}{m\pi} \sin \frac{m\pi}{n} \cos \left(\frac{2m\pi}{T} t + \frac{m\pi}{n} \right) \right].$$

На рис. 1а приведены графики последовательности прямоугольных импульсов в координатах u и t для различных значений n , а на рис. 1б — спектры этой функции для тех же значений n , полученные в [6], (u — амплитуда, t — время).

В рассмотренном примере с увеличением n (уменьшением частоты повторения прямоугольного импульса) увеличивается число спектральных компонентов, с помощью которых может быть представлена функция. В пределе, когда $n \rightarrow \infty$, линейчатый спектр обратится в сплошной.

Способ формирования акустического колебания [5] заключается в генерировании, фокусировании и локализации в заданной области пространства акустических сигналов от N первичных источников с определенными амплитудами, частотами и фазами. Для синтезирования акустического колебания заданной формы генерирование колебания производят формированием вспомогательных гармонических акустических колебаний с частотами, амплитуда-

ми и фазами, равными частотным, амплитудным и фазовым составляющим, соответствующим первым N коэффициентам ряда Фурье.

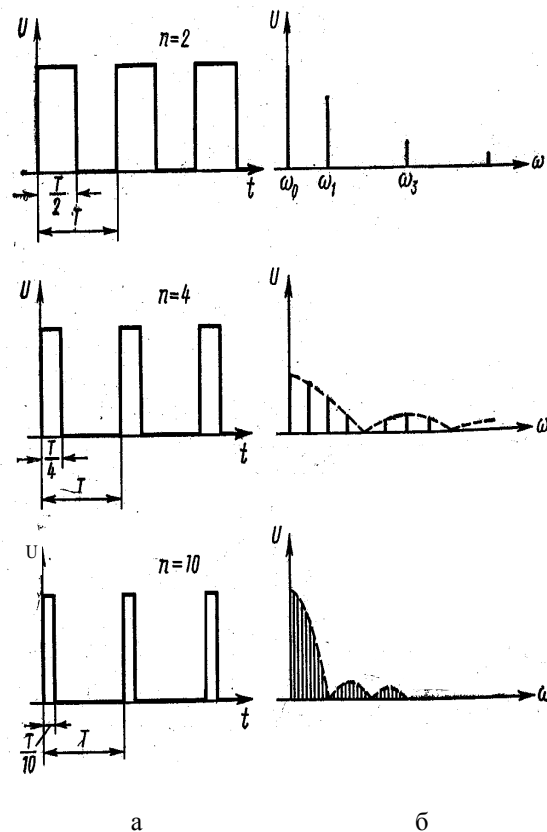


Рис. 1. Графики последовательности (а) и спектры (б) прямоугольных импульсов

В работе [3] представлены функции, описывающие импульсы различного вида (треугольного, колокообразного, прямоугольного и т.д.). Импульс любой конкретной формы характеризуется спектром, который начинается с нулевой моды и стремится к бесконечности.

При использовании компьютерных вычислительных средств легко расчетным путем по стандартным формулам теории антенных решеток получить необходимые значения амплитуд, частот и фаз колебаний излучающих элементов в системе излучателей, сигналы от которых и будут производить формирование последовательности импульсов задаваемого профиля [9–12].

Возьмем, например, пять акустических источников, излучающих гармонические колебания с расчетными амплитудами, частотами и фазами. Параметры сигналов

соответствуют параметрам составляющих ряда Фурье, полученным при предварительном разложении функции, описывающей требуемую форму акустических импульсов. В результате сложения волн от нескольких источников с учетом их пространственного расположения в определенной точке пространства получаем колебания с заранее predetermined профилем.

На рис. 2 показан принцип формирования прямоугольных импульсов в дальнем поле. $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_5$ – длины звуковых волн, генерируемых каждым из излучателей.

Реализация способа не зависит от типа акустических возбудителей в рамках линейной акустики. Отдельные возбудители могут быть расположены вдоль линии или с целью улучшения фокусировки на поверхности зеркала любой приемлемой для фокусировки формы, например, параболической.

В работах [3, 4] описана теория синфазной работы излучателей для осуществления направленного излучения системы. Они должны быть расположены, например, на прямой линии на одинаковом расстоянии друг от друга, равном $d = \lambda / 2$. На большом расстоянии разница пробега между сферическими лучами, излучаемыми источником N и источником $N-1$, будет составлять: $\Delta r = d \sin \gamma$ (γ – угол между направлением наблюдения и направлением, перпендикулярным к поверхности излучения). В отличие от систем, описанных в работах [3, 4], работа отдельных излучателей по новому способу [5] несинфазная.

Характеристику акустического колебания в виде последовательности импульсов в точке наблюдения будем задавать в виде изменения звукового давления p_N (рис. 2).

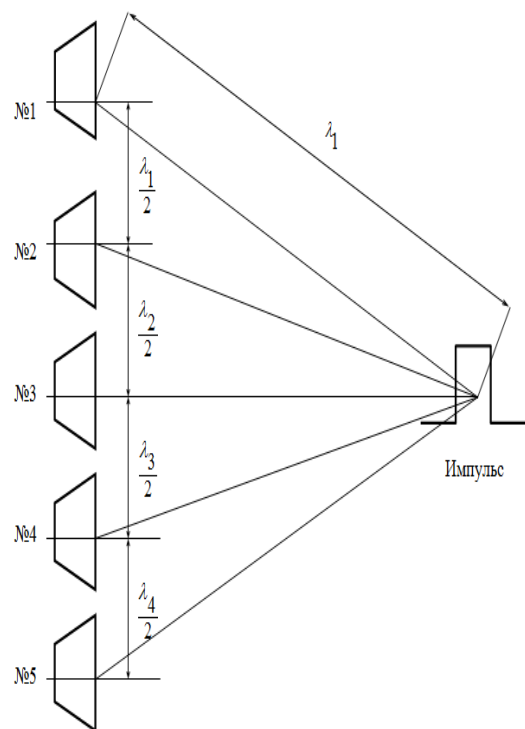


Рис. 2. Формирование импульса

Рассчитаем звуковое поле, создаваемое системой из пяти диффузорных громкоговорителей, расположенных на одной прямой в пределах плоскости, проходящей через оси излучателей. Каждый излучатель на низких частотах обычно излучает сферическую волну.

Звуковое давление p гармонической акустической волны на расстоянии r от одиночного источника описывается выражением

$$p = \frac{P_m}{r} \exp \left[j\omega \left(t - \frac{r}{c} \right) \right], \quad (5)$$

где p_m – начальная амплитуда; c – скорость распространения звука в среде; r – расстояние до точки наблюдения.

Форма диаграммы направленности $R(\Theta)$ группового излучателя, состоящего из n диффузорных громкоговорителей, зависит от отношения [7]

$$\frac{D}{\lambda_{\min}} = \frac{(n-1)d}{\lambda_{\min}}, \quad (6)$$

где d – расстояние между соседними громкоговорителями; D – общая длина

системы излучателей; λ_{min} – минимальная длина волны частотного диапазона.

В заданной точке на оси группового излучателя давления p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 от каждого из сферических излучателей суммируются на основе принципа суперпозиции. В результате в заданной точке наблюдения имеем $p_N = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5$. Точку формирования импульса помещаем в область дальнего акустического поля, начинающегося с расстояния r_{min} , большего, чем длина волны звука λ_1 от излучателя, параметры которого соответствуют первой из составляющих ряда Фурье: $r_{min} \geq \lambda_1$.

На рис. 3 представлена схема акустической системы, реализующей способ синтеза акустического колебания. Устройство состоит из схемы начального запуска 1 начального запуска, генераторов 2_1-2_N гармонических колебаний, фазовращателей 3_1-3_N , усилителей 4_1-4_N и излучателей звука 5_1-5_N .

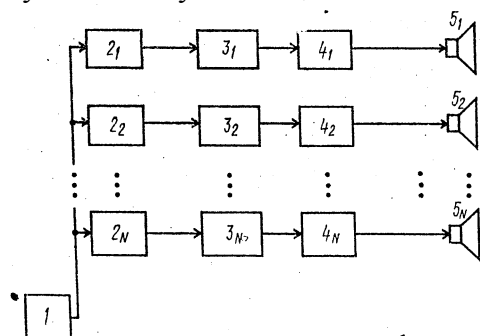


Рис. 3. Система акустических излучателей

Работу устройства рассмотрим на примере первого канала системы.

По сигналу, генерируемому схемой 1 начального запуска генератора 2_1-2_N , начинают создавать гармонические колебания с частотами $\omega_1 \dots \omega_N$, соответствующими частотам первых Фурье – гармоник задаваемого сигнала. На выходе генераторов сигналы имеют вид

$$U_{11} = \sin(\omega_1 t). \quad (7)$$

Сигналы поступают дальше на фазовращатели 3_1-3_N , формирующие необходимые сдвиги, и сигнал приобретает вид

$$U_{12} = \sin(\omega_1 t + \varphi_1), \quad (8)$$

где φ_1 – необходимые фазовые сдвиги первых гармоник. Сигналы U_{12} поступают на усилители 4_1-4_N , которые формируют необходимое соотношение между амплитудами гармоник, соответствующим амплитудам разложения Фурье. Таким образом, на выходе усилителей присутствует сигнал вида

$$U_{13} = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1). \quad (9)$$

С учетом фазовых искажений тракта соотношение (9) имеет вид

$$U_{14} = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1 + \delta\varphi_1), \quad (10)$$

где $\delta\varphi_1$ – коррекция фазовых искажений тракта формирования гармоники.

Заключение

Разработаны научно-технические основы метода генерирования акустических волн как энергонесущих низкочастотных составляющих спектра акустических колебаний в виде импульсов практически любой формы в заданной точке пространства.

Разработан и защищен авторским свидетельством (а.с. № 1693631) новый способ формирования акустических колебаний. Реализация способа не зависит от типа акустических возбудителей в рамках линейной акустики. Предложена принципиальная схема устройства, предназначенного для реализации способа. Отдельные излучатели могут быть расположены вдоль линии или с целью улучшения фокусировки на поверхности зеркала любой приемлемой для фокусировки формы, например, параболической.

Список использованной литературы

1. Nakamura Toshiaki, Nakamura Akira. A method for generation of finite amplitude pulse of sinusoidal sound in free space // J. Acoustic. Soc. Jap. – 1983. – Vol. 4, N 3. – P. 149–155.
2. Гусев В.Э., Карабутов А.А. К вопросу о возбуждении акустических импульсов распределенными источниками, движущимися с трансзвуковой скоростью // Акуст. журн. – 1982. – Вып. 27, № 2. – С. 213–219.

3. Pimonov L. Les infra-sons. – Paris: CNRS, 1976. – 277 p.
4. Сокол Г.И. Особенности инфразвуковых процессов в инфразвуковом диапазоне частот. – Дніпропетровськ: Промінь, 2000. – 136 с.
5. Способ формирования акустического колебания: А. с. № 1693631 СССР, МКИ G 10 k 1/10 / В.Д. Бондарев, Г.И. Сокол, И.А. Козловский, Д.А. Шамровский (СССР). – № 4672208/10; Заявл. 06.01.89; Опубл. 23.11.91. Бюл. № 43. – С. 2.
6. Лепендин В.А. Акустика. – М.: Наука, 1980. – 546 с.
7. В.К. Иоффе, В.Г. Корольков, М.А. Сапожков. Справочник по акустике. – М.: Связь, 1979. – 312 с.
8. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – М.: Наука, 1986. – 554 с.
9. Сокол Г.И. Способ формирования акустического колебания / Г.И. Сокол, В.Н. Савчук // II Всеукр. молодіжна наук.-практ. конф. з міжнар. участю "Людина і космос". Зб. тезів. – Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2000. – С. 247.
10. Сокол Г.И. О формировании акустического колебания / Г.И. Сокол, В.Н. Савчук // IV Міжнар. молод. наук.-практ. конф. з міжнар. участю "Людина і космос". Зб. тезів. – Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2001. – С. 277.
11. Проектирование системы акустических излучателей, предназначенной для моделирования колебаний заданного профиля / Г.И. Сокол, В.Н. Савчук // Системне проектування та аналіз характеристик аеро-космічної техніки. – Дніпропетровськ: Навчальна книга, 2001. Т. 3. – С. 35–45.
12. Сокол Г.И. Формирование импульса заданного профиля группой излучателей, представляющих собой члены ряда Фурье // Междунар. акуст. симп. "Консонанс-2003". – Сб. науч. статей. Киев, 1–3 октября, 2003. – Киев, 2003. – С. 238–241.
13. Sokol G. The Method of single oscillation of a special Form // Annual Scientific Conference. GAMM 2002: Ausburg, 25-28 March 2002. – Ausburg, 2002. – P. 157.

Статья поступила 23.02.2015