

СИНТЕЗ ЗАГРАДИТЕЛЬНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПОСРЕДСТВОМ ДИСКРЕТНОГО НАБОРА ПЕРИОДИЧЕСКИХ N -ВОЛН

В статье рассмотрена внутренняя противоречивость использования искусственно наведенных шумовых акустических полей как способа защиты информации, передаваемой акустическими каналами. В качестве возможного разрешения сложившегося противоречия предложен синтез стационарных пространственных акустических полей с локальными интерференционными зонами пониженной акустической мощности. Разработаны физическая и математическая модели такого поля. Предложено использование аппроксимирующих формул для расчета радиального профиля акустического давления N -волны в пределах периода. Показано, что предложенная аппроксимация достаточно хорошо согласуется с экспериментальными результатами, полученными для искрового разряда. Представлены результаты моделирования.

Ключевые слова: нелинейные волновые структуры, фазированные решетки, шумовые заградительные поля.

Введение. Одним из способов защиты информации, передаваемой акустическими каналами, т.е. исключение несанкционированного доступа к ней посредством технических спецсредств, является использования наведенных шумовых акустических полей [1].

Однако, если использовать шумовое поле с невысокой, по сравнению с полезным сигналом, акустической мощностью, существующие методы математической обработки данных [2] позволяют выделять исследуемый сигнал на фоне таких помех. Использование же шумовых полей с акустической мощностью, превышающей возможности существующих средств обработки сигналов, как правило, приводят к потере полезного сигнала также и для потребителя, что обуславливает внутреннюю противоречивость предложенного способа защиты информации. Возможным разрешением сложившегося противоречия может быть синтез стационарных пространственных акустических полей с локальными интерференционными зонами пониженной акустической мощности. Источник и потребитель акустической информации необходимо размещать в данных зонах. При предложенном подходе синтезированное шумовое акустическое поле не приведет к искажению полезного сигнала в ограниченной области пространства и будет носить характер заградительного.

Физическая и математическая модели. Синтез шумовых заградительных полей может быть осуществлен дискретными фазированными акустическими излучающими решетками (ФАИР) с точечными источниками звуковых волн в узлах. Методы управления фазированными антенными решетками, используемые при расчете структур синтезированных полей, опираются на базис гармонических волновых структур и не могут быть корректно применены к ФАИР с высокой акустической мощностью. В то же время, акустические дисперсионные свойства воздушной среды таковы, что на достаточно коротких расстояниях интенсивная гармоническая звуковая волна в процессе распространения претерпевает сильное искажение своей формы [3]. Это может приводить к существенной потере устойчивости пространственной структуры синтезированного поля.

Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо использовать базисные волновые структуры (функции), обладающие достаточной устойчивостью формы при высоких интенсивностях на расстояниях $\sim 10^1 \div 10^2$ м. В качестве таких функций предлагается использовать периодические N -волны [4]. Зависимость давления от времени в данной точке при прохождении сферической N -волны приведена на рис. 1. Множитель r/r_0 используется для коррекции уменьшения амплитуды волны в результате ее сферической расходимости. Если гармоническая функция однозначно определяется тройкой параметров $(A; T; \varphi)$, где A - амплитуда волны, T - период волны, φ - набег фазы, то базисная функция (N -волна) может быть задана четверкой параметров $(A; T; \xi; \varphi)$, где дополнительный параметр $\xi = \tau/2$ назовем полушириной цуга N -волны (см. рис. 1).

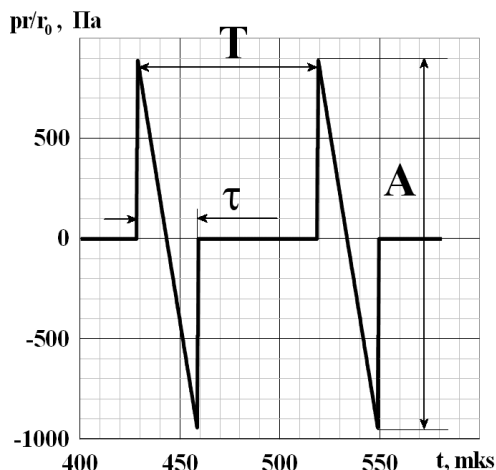


Рис. 1. Зависимость давления от времени в выделенной точке пространства при прохождении N -волны

Кроме возможности использовать дополнительную степень свободы, такой тип базисных волновых структур предложен еще и потому, что N -волны в характерной для их существования области амплитуд давления ($\sim 10^2 \div 10^3$ Па) проявляют устойчивость своей формы. Так, согласно [3], изначально гармоническая звуковая волна большой амплитуды трансформируется в периодическую N -волну. Численные расчеты, проведенные авторами работы [4], показывают, что импульс взрывной волны принципиально несимметричной формы [5] при прохождении в воздушной среде трансформируется в одиночную N -волну. Более того, приведенные в работе [4] результаты экспериментальных исследований акустики осциллирующего искрового разряда показывают, что порожденная разрядом звуковая волна сложной формы также трансформируется в N -волну на расстояниях $\sim 10^{-2}$ м от зоны локализации разряда.

Согласно [6] форма одиночной сферической N -волны может быть получена из решения обобщенного уравнения Бюргерса, в котором учитываются релаксационные процессы и сферическая расходимость нелинейной волны в однородной среде. Данное уравнение может быть записано в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{p}{r} = \frac{\varepsilon}{\rho_0 c_0^3} p \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{b}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2} + \sum_{v=1}^M d_v \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{-\infty}^{\tau} \frac{\partial p}{\partial \tau'} e^{-\frac{(\tau-\tau')}{\tau}} d\tau', \quad (1)$$

где p - акустическое давление; r - радиальная координата;

$\tau = t - \frac{(r-r_0)}{c_0}$ - время в системе координат, связанной с бегущей волной;

c_0 - равновесная скорость звука на низких частотах;

r_0 - расстояние до источника звука;

ρ_0 - плотность воздуха; ε - коэффициент нелинейности воздуха;

b - коэффициент вязкости;

M - общее количество процессов диссипации звуковой энергии при неупругих столкновениях молекул среды.

В общем случае задача управления ФАИР требует проводить численное решение уравнения (1) для каждого узла решетки с различным набором параметров парциальных N -волн. Тогда затраты вычислительных ресурсов должны возрастать пропорционально количеству узлов решетки. Введение аппроксимирующей формулы, описывающей N -волны с достаточной точностью, позволяет избежать многократного решения нелинейного волнового уравнения и минимизировать данные затраты. Ниже предлагается кусочно-

аппроксимирующая формула для радиального профиля акустического давления N -волны в пределах периода, записанная для системы отсчета, связанной с бегущей волной:

$$\begin{cases} p(r) = p_0 e^{-\left(\frac{r+\xi}{l}\right)^2}, & -\frac{T}{2} < r < r_1; \\ p(r) = -\frac{p(r_1)}{r_1} r, & r_1 < r < r_2; \\ p(r) = -p_0 e^{-\left(\frac{r+\xi}{l}\right)^2}, & r_2 < r < \frac{T}{2}. \end{cases} \quad (2)$$

В формуле (2) p_0 – амплитуда акустического давления; l – характерная длина фронта N -волны; ξ – полуширина цуга N -волны; T – период волны. Значения r_1 и r_2 определяются из условия равенства первых производных на границах областей с линейной и нелинейной аппроксимацией:

$$r_{1,2} = \pm \frac{\xi + \sqrt{\xi^2 - 2l^2}}{2}.$$

Предложенная аппроксимация достаточно хорошо согласуется с экспериментальными результатами, полученными для искрового разряда в работе [4], что наглядно проиллюстрировано на рис. 2.

Результаты моделирования. Поскольку длина звуковых волн акустического диапазона лежит в интервале 1.70×10^{-2} м ÷ 1.65×10^1 м, то для моделирования двумерной структуры синтезированного шумового акустического поля при помощи предложенной аппроксимации выбраны следующие параметры ФАИР: характерный размер 2 м, шаг между узлами 0,1 м.

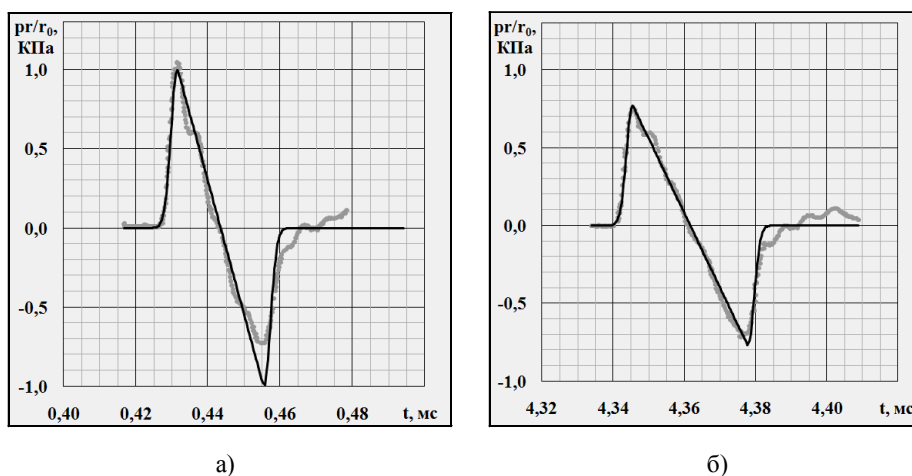


Рис. 2. Аппроксимация N -волны, порожденной осциллирующим искровым разрядом:
 а) кривая получена на расстоянии 0,15 м от разряда;
 б) кривая получена на расстоянии 1,5 м от разряда.
 Серые точки – эксперимент, черная линия – расчет по формуле (2)

Рабочий пакет N -волн выбран одинаковым для каждого узла. Он представляет собой дискретный набор периодических N -мод равной амплитуды с неэквидистантным интервалом между частотами в диапазоне 100 Гц ÷ 20 КГц. Интервал между частотами N -мод выбран возрастающим с увеличением частоты по закону $\omega_n = \omega_0 2^n$. Сквасность N -мод с частотой не меняется и имеет значение 50%.

На рис. 3 представлено стационарное шумовое поле, сгенерированное системой двух ФАИР, расположенных вдоль осей x , y декартовой системы координат и отстоящих на 10 м от начала координат.

Как показали результаты моделирования, пространственная структура шумового поля имеет протяженные области, максимальная акустическая мощность звука в которых более чем на порядок ниже средней акустической мощности данного поля. Назовем эти области защищенными зонами. Взаимное расположение областей с повышенной акустической мощностью, называемых подавляющим полем, таково, что их совокупность не имеет окон прозрачности для радиальных направлений распространения звука из защищенных зон. Последнее означает, что стационарное шумовое акустическое поле, синтезированное при помощи предложенной конфигурации ФАИР, для защищенных зон является заградительным.

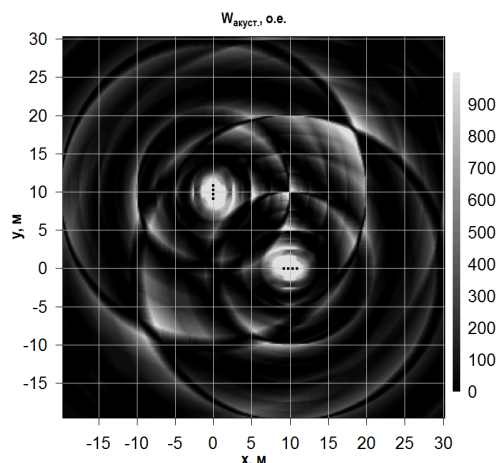


Рис. 3. Пространственное распределение акустической мощности $W_{\text{акуст. о.в.}}$ поля, сгенерированного системой двух взаимно перпендикулярных ФАИР. Отрезками пунктирных линий схематически изображены ФАИР с сохранением масштаба по длине

Выводы. К основным результатам настоящей работы целесообразно отнести следующие положения:

1. Выбор в качестве базисных волновых структур периодических N -волн, более предпочтительных по сравнению с гармоническими волнами, позволяет осуществлять синтез заградительных шумовых акустических полей, обеспечивающих защиту от утечки информации по акустическим каналам посредством подавления полезного сигнала мощным шумовым фоном.

2. Уровень акустической мощности шума в областях с пониженной амплитудой звукового поля, называемых защищенными зонами, более чем на порядок ниже средней акустической мощности подавляющего поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Давлет'янц О.И. Программно-аппаратный комплекс зашиту інформації від витоку акустичним каналом / О.И. Давлет'янц, Р.В. Бурзаковський // Наук.-тех. журнал "Захист інформації". – № 4. – 2010.
2. Форощук І.В. Загроза витоку інформації в умовах впливу надширококутних сигналів / І.В. Форощук // Науково-технічний журнал "Захист інформації". – №1. – 2010.
3. Руденко О.В. Нелинейные пилообразные волны / О.В. Руденко // Успехи физических наук. – Т. 165, № 9. – 1995. – С. 1-31.
4. Сферически расходящиеся ударные импульсы в нелинейной релаксирующей среде / П.В. Юлдашев, М.В. Аверьянов, В.А. Хохлова и др. // Акустический журнал. – Т 54, № 1. – 2008. – С. 40-50.
5. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1966. – 686 с.
6. Руденко О.В., Солуян С.И. Теоретические основы нелинейной акустики / О.В. Руденко, С.И. Солуян. – М.: Наука, 1975. – 475 с.

Надійшла: 17.04.2013 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Єрохін В.Ф.