

УДК 534.84+534.87

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АКУСТИЧЕСКИХ ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ В КАБИНЕ АВТОМОБИЛЯ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ

В. Б. ГАЛАНЕНКО*, А. Я. КАЛЮЖНЫЙ**, А. А. КОВТОНЮК**

* Национальный технический университет Украины “КПИ”, Киев

** Научно-производственное предприятие “Дельта”, Киев

Получено 24.02.2000

Предложена модель звукового поля, порождаемого сигналами речи и шума в кабине автомобиля. Модель учитывает сложную форму кабины, частотную зависимость поглощения звука ее поверхностями и пространственно-корреляционную структуру распределенного источника шума. Расчет звукового поля основан на волновом подходе для диапазона низких частот (до 1000 Гц) и на лучевом приближении для более высоких частот спектра сигнала. Разработано программное обеспечение, позволяющее симулировать сигналы речи и помех, возникающих при движении автомобиля внутри его кабины. Пакет программ может быть использован в качестве имитатора звукового поля при разработке автомобильных устройств кодирования и распознавания речи. Для проверки модели проведено сопоставление спектра имитированного шума двигателя с результатами натуральных измерений. На основе разработанной модели исследована эффективность работы микрофонных антенн как средств очистки речи от шума, соответствующая различным алгоритмам пространственно-временной обработки сигнала на фоне помех.

Запропоновано модель звукового поля, породжуваного сигналами мови та шуму всередині кабіни автомобіля. Модель враховує складну геометрію кабіни, частотну залежність поглинання звуку її поверхнями та просторово-кореляційну структуру розподіленого джерела шуму. Розрахунок акустичного поля базується на хвильовому підході для низьких частот (до 1000 Гц) та на наближенні променевої акустики для більш високих частот спектру сигналів. Розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє симулювати сигнали мови та завад, що виникають під час руху автомобіля всередині його кабіни. Пакет програм може бути застосований як імітатор звукового поля при розробці автомобільних пристроїв кодування та розпізнавання мови. Для перевірки моделі проведено співставлення спектру імітованого шуму двигуна з результатами натурних вимірювань. На основі розробленої моделі досліджено ефективність мікрофонних антен як засобів очищення мови від шуму, що відповідає різним алгоритмам обробки сигналу на тлі завад.

Model for the speech and noise sound fields in cabin of a car is proposed. The model accounts a complicated geometry of cabin, frequency dependent sound absorption by its surfaces and spatial correlation structure of distributed noise source. Computing of the sound field is based on the wave approach for low frequencies (below 1000 Hz) and the ray approach for higher frequency range of the signal spectrum. The software is developed, which allows to simulate speech and noise fields arising during motion of the car in its cabin. Mentioned software is proposed as simulator of the sound field when car speech encoding and recognition devices are designed. To check the model adequacy the spectra of simulated noise of engine and the results of natural measurements are compared. On base of developed model the effectivity of microphone arrays as tools for signal detecting from noise is investigated corresponding to different signal processing algorithms on the background of interferences.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из актуальных направлений развития современной звукотехники является широкое внедрение в автомобилях звукоприемных устройств для систем сотовой телефонии и речевого управления, не связанных механически с водителем (в англоязычной технической литературе они известны как “hands-free systems”).

Технология разработки таких систем включает в качестве обязательного этапа проверку эффективности тех или иных технических решений. Если речь идет о проверке на уровне готового изделия или действующего макета, то уместным является проведение натуральных экспериментов в кабине движущегося транспортного средства. Целесообразна также проверка методом физическо-

го моделирования. Так, в работе [1] описан стенд, включающий переоборудованную кабину автомобиля, где шумы имитируются системой громкоговорителей.

Однако как натурные эксперименты, так и физическое моделирование сопряжены со значительной затратой времени и материальных ресурсов. Поэтому на более ранних стадиях разработки, в частности, на этапе разработки алгоритмов, может быть полезен еще один вид моделирования, а именно компьютерное моделирование, в ходе которого поле шума и сигнала в кабине имитируется на основе некоторой математической модели. Одна из задач данной работы заключается в разработке математической модели акустического поля в кабине автомобиля и соответствующего ей программного обеспечения для имитации полей

полезного речевого сигнала и шума, сопутствующего движению автомобиля.

Другая задача обусловлена очевидной особенностью систем “hands free”, состоящей в относительной удаленности микрофона от источника речевого сигнала. В связи с этим большую роль в таких устройствах играют акустические шумы. Следовательно, в автомобильных звукоприемных системах должны быть приняты более эффективные, чем обычно, меры для выделения речевого сигнала на фоне мешающих воздействий. Перспективным направлением решения этой проблемы является применение микрофонных антенн, которые обладают большими возможностями для селекции речевого сигнала на фоне помех по сравнению с одиночным микрофоном. В этом случае в состав устройств для распознавания или кодирования речи должен быть введен дополнительный блок, осуществляющий пространственно-временную фильтрацию речевого сигнала на фоне помех.

Алгоритм фильтрации, равно как и структура самой микрофонной антенны (ее состав и размещение), подлежит оптимизации с учетом не только спектрального состава полезного и мешающего сигналов, но и пространственной структуры соответствующих акустических полей. Эти же факторы непосредственно влияют на эффективность работы устройств связи и речевого управления и должны быть учтены в процессе разработки.

Целью настоящего исследования была разработка и тестирование методики, алгоритмического и программного обеспечения, позволяющих оценивать эффективность как структуры микрофонной антенны, так и алгоритмов обработки для оптимизации параметров тракта приема речевого сигнала в кабине автомобиля. В качестве примера применения предлагаемой методики, основанной на имитировании сигналов речи и шума, проведено сопоставление эффективности некоторых алгоритмов пространственно-временной фильтрации сигнала речи на фоне поля шума, создаваемого автомобильным двигателем.

В первом разделе статьи обсуждается общая схема моделирования звукового поля в замкнутом объеме кабины. Второй раздел посвящен описанию и обоснованию математических алгоритмов расчета функции Грина и характеристик поля помех, лежащих в основе моделирования звукового поля и анализа эффективности методов пространственно-временной обработки сигналов. В третьем разделе рассматриваются алгоритмы пространственно-временной фильтрации сигнала речи на фоне шума с помощью микрофонных антенн. Четвертый раздел иллюстрирует приме-

нение разработанной программы компьютерного моделирования к исследованию эффективности некоторых алгоритмов пространственно-временной фильтрации.

1. ЦЕЛИ И МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ СИГНАЛА И ШУМА

При моделировании поля полезного сигнала исходным является отрезок звучащей речи (фраза, отдельные слова или слоги), произнесенный перед микрофоном и введенный в память компьютера с помощью звуковой карты. Цель моделирования в данном случае состоит в том, чтобы воспроизвести этот отрезок речи в нескольких точках объема кабины, где расположены элементы микрофонной антенны, в виде некоторой функции времени с учетом изменений, вызванных отражениями от частично поглощающих звук поверхностей. При этом источник звука (источник голоса человека) аппроксимирован точечным источником (ненаправленным в области низких частот и с характерной для данного случая направленностью в области более высоких частот). Его координаты определяются положением головы водителя. Технология расчета предполагает преобразование исходного сигнала речи по Фурье и вычисление комплексного амплитудно-фазового коэффициента передачи от источника в любую из точек приема на каждой частоте спектра. Фактически речь идет о вычислении функции Грина $G(\omega, \mathbf{r}/\mathbf{r}_0)$ некоторой краевой задачи для волнового уравнения в трехмерной области, ограниченной поверхностями кабины, при соответствующим образом сформулированных граничных условиях (здесь \mathbf{r} – координаты точки приема, \mathbf{r}_0 – координаты источника).

Перемножение исходного спектра на функцию Грина и последующее обращение по Фурье дает сигнал речи в избранной точке наблюдения, пропорциональный сигналу на выходе одиночного ненаправленного микрофона. Если же спектр на выходе каждого из элементов антенны подвергнуть соответствующей амплитудно-фазовой фильтрации, а затем результаты с выходов всех микрофонов просуммировать и обратить по Фурье, то полученная временная выборка будет имитировать сигнал речи на выходе антенны.

При моделировании шума будем исходить из того, что вне зависимости от природы его источника шум в кабине связан с колебаниями внутренних поверхностей кабины, которые, таким образом, представляют собой некий распределенный источник. Если бы колебательные скорости достаточно большого количества элементов поверхно-

сти были измерены, то следовало бы аппроксимировать распределенный источник совокупностью точечных источников и провести для каждого из них расчеты, подобные тем, которые выполнялись для имитирования сигнала. При этом в расчетах фигурировала бы матрица Грина, соответствующая корреспондирующим точкам на излучателе и приемной антенне. Однако, как правило, экспериментальное исследование вибраций поверхности не бывает достаточно полным. Поэтому при моделировании шума приходится комбинировать экспериментальные данные с феноменологически подбираемыми параметрами, которые увязываются с физическими представлениями о природе источников шума. В их число входят количество и расположение точечных источников, соотношение их амплитуд, степень различия усредненных спектров, вид функции взаимной корреляции источников и зависимость радиуса корреляции от частоты. Так, шум двигателя передается в салон через участок передней стенки, отделяющей его от моторного отсека, что и определяет положение источников. Если измерения вибраций были проведены только для одной точки на этом участке, то приходится приписывать всем источникам одинаковую усредненную спектральную плотность.

Для имитации взаимной корреляции источников в компьютере первоначально генерируют N независимых случайных последовательностей (по количеству источников). Из них с помощью линейного преобразования, вид которого может быть найден с использованием разложения Холецкого [2] по заданной ковариационной матрице источников, формируются последовательности с заданной для каждой частоты взаимной корреляцией. Спектры шума, пересчитанные с помощью матрицы Грина от каждого источника на каждый из микрофонов, после соответствующей пространственно-временной фильтрации того или иного вида, суммирования и обращения по Фурье создают имитированные сигналы помех на выходе одиночного микрофона либо антенны.

Смешивая сигнал речи и шума в определенной пропорции, задаваемой на выходе одиночного микрофона, получаем имитированную смесь речи и шума на выходе антенны с учетом эффектов пространственно-временной фильтрации. Все имитированные сигналы могут быть воспроизведены громкоговорителем и, таким образом, обеспечена возможность субъективной оценки эффективности того или иного воздействия на смесь сигнала и шума.

Кроме имитации сигналов, ориентированной на непосредственное восприятие звука, в задачу мо-

делирования входит вычисление объективных характеристик, например, таких как отношение сигнал/шум, получаемых с помощью известных выражений, в которые также входит функция Грина.

2. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОВОГО ПОЛЯ

Расчет функции Грина и вычисление корреляционной функции помех являются наиболее важными и трудоемкими этапами рассматриваемой процедуры моделирования. Особенность указанных задач состоит в том, что спектр речи и характерные спектры помех занимают широкий диапазон частот (несколько октав), в пределах которого существенно изменяется соотношение между характерными размерами участков внутренней поверхности кабины и длиной звуковой волны. Кроме того, сложность формы кабины исключает возможность получения аналитического решения волнового уравнения в замкнутой форме. В результате не удается построить расчет матрицы Грина по единой схеме для всех частот диапазона речи.

2.1. Расчет функции Грина для области высоких частот

В этой области расчет проводится методами геометрической акустики, в соответствии с которой звуковые сигналы приходят от источника в точку наблюдения по лучевым траекториям, соответствующим последовательным отражениям разной кратности от поверхностей, ограничивающих объем. В работе [3] содержится обзор программных продуктов, реализующих два метода построения лучевых траекторий: метод ведения лучей ("ray tracing") и метод мнимых источников. Констатируется, что последний из них применяется преимущественно при расчете полей в объемах правильной формы (прямоугольных параллелепипедах). Тем не менее, для программной реализации мы выбрали метод мнимых источников, поскольку для его последовательного применения достаточно аппроксимировать отражающие поверхности фрагментами плоскостей (сложность формы не является принципиальным ограничением). В данной задаче такая аппроксимация, с нашей точки зрения, уместна.

В качестве геометрической модели кабины автомобиля была выбрана прямоугольная призма, высота которой совпадает с шириной кабины, а в основании лежит многоугольник, аппроксимирующий профиль кабины в сечении вертикальной плоскостью, проходящей через продольную ось.

Акустические свойства различных фрагментов поверхности характеризовались частотной зависимостью коэффициентов поглощения звука для соответствующих облицовочных материалов. В соответствии с лучевыми представлениями звуковое поле является совокупностью сигналов, задержанных во времени и с измененными амплитудами, зависящими от длины лучевых траекторий и отражающих свойств соответствующих данной траектории поверхностей. Вследствие частотной зависимости коэффициентов поглощения спектры парциальных отраженных сигналов различаются и, следовательно, отраженные сигналы не являются копиями излученного сигнала. Этот эффект учитывается вычислением функции Грина для каждой частоты спектра сигнала отдельно.

Практическая реализация метода мнимых источников предполагает формальное построение мнимых источников, число которых быстро нарастает с увеличением порядка отражения. Целесообразно уже на стадии построения мнимых источников отсеять некоторую их часть, которая не может быть связана ни с одной лучевой траекторией, соединяющей корреспондирующие точки. Сущность последующих действий заключается в дальнейшем отсеке “лишних” источников и отыскании действительных лучевых траекторий с учетом возможного затенения одних поверхностей другими.

2.2. Расчет функции Грина для области низких и средних частот

Для расчета функции Грина в этой области частот исходим непосредственно из волнового уравнения для звукового давления. При математической постановке задачи в данной работе приняты некоторые упрощающие предположения. Первое из них состоит в том, что каждую из боковых поверхностей кабины, являющихся основаниями призмы и реально состоящих из двух участков с разными поглощающими свойствами, можно заменить на достаточно низких частотах единичными поверхностями с некоторой усредненной частотной зависимостью коэффициента поглощения

$$\alpha_{cp} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2}{S_1 + S_2}.$$

Второе предположение заключается в том, что поглощающие поверхности рассматриваются как локально реагирующие. Тогда на каждой из них можно сформулировать обобщенное гранич-

ное условие Неймана:

$$q_j p + \frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}_j} = 0|_{(x,y) \in S_j}, \quad (1)$$

где \mathbf{n}_j – внешняя нормаль к j -ой поверхности, а адмиттансный множитель q_j предлагается вычислять через коэффициент поглощения α_j на данной частоте по формуле

$$q_j = -\frac{ik(1 - \sqrt{1 - \alpha_j})}{1 + \sqrt{1 - \alpha_j}}. \quad (2)$$

Запишем волновое уравнение в виде

$$\frac{\partial^2 p}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 p}{\partial^2 y} + \mathbf{L}p = ik\delta(x - x_0, y - y_0)\delta(z - z_0), \quad (3)$$

где

$$\mathbf{L} = \frac{d^2}{dz^2} + k^2$$

трактруется как оператор поперечного сечения. Его областью определения являются дважды дифференцируемые функции координаты z (отсчитываемой вдоль высоты призмы), удовлетворяющие граничным условиям вида (1) на основаниях призмы.

Известно, что любая функция из этой области может быть представлена в виде равномерно сходящегося ряда по собственным функциям оператора \mathbf{L} . Тогда решение уравнения (3) можно искать в виде

$$p(x, y, z) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n(x, y) u_n(z). \quad (4)$$

Нетрудно показать, что симметричные и антисимметричные собственные функции определяются формулами

$$u_n(z) = \begin{cases} \cos(\beta_n z), & n - \text{чет.}, \\ \sin(\beta_n z), & n - \text{нечет.} \end{cases} \quad (5)$$

Здесь числа β_n – суть решения трансцендентных уравнений

$$\begin{cases} q \cos\left(\frac{\beta_n H}{2}\right) - \beta_n \sin\left(\frac{\beta_n H}{2}\right) = 0, & n - \text{чет.}, \\ q \sin\left(\frac{\beta_n H}{2}\right) + \beta_n \cos\left(\frac{\beta_n H}{2}\right) = 0, & n - \text{нечет.} \end{cases} \quad (6)$$

В этих уравнениях q – адмиттансный множитель, определяемый по формуле (2) через усредненные коэффициенты поглощения на основаниях призмы.

Подставляя решение в форме (4) в волновое уравнение (3) и используя ортогональность собственных функций, приходим к уравнениям для

коэффициентов ряда (4) как функций координат, лежащих в плоскости основания призмы:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 C_n}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 C_n}{\partial^2 y} + (k^2 - \beta_n^2)C_n = \\ = ik \frac{u_n(z_0)}{\|u_n\|} \delta(x - x_0, y - y_0). \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь $\|u_n\|$ – норма собственной функции, вычисляемая для четного и нечетного номера с помощью формул

$$\|u_n\| = \frac{H}{2} \left(1 \mp \frac{\sin(\beta_n H)}{\beta_n H} \right). \quad (8)$$

Решение уравнения (7) для каждого номера n на заданной сетке частот при граничных условиях (1) находим численно, используя стандартную схему метода конечных элементов. Практически важным является вопрос о количестве собственных функций, которые следует принять в расчет. Оказалось, что приемлемая точность достигается, если к собственным функциям, для которых $\beta_n < k$, добавить две–три функции, которым соответствует $\beta_n > k$. Естественно, что с ростом частоты количество учитываемых мод нарастает. Возрастает и требуемая детальность разбиения многоугольника, лежащего в основании призмы, на конечные элементы. Этими обстоятельствами ограничивается верхняя частота, для которой удастся реализовать предлагаемый алгоритм расчета с приемлемыми затратами машинного времени и ресурсов. Так, в приведенном ниже примере расчета поля в кабине автомобиля среднего класса в диапазоне частот от 30 до 1000 Гц количество учитываемых мод изменялось от 3 до 11, а требуемая детальность разбиения не превышала $(1 \div 1.5) \cdot 10^3$ конечных элементов.

2.3. Расчет поля помех

Как указывалось выше, поле помех в рассматриваемых задачах представляется в виде суперпозиции полей точечных источников, аппроксимирующих вибрации внутренних поверхностей кабины. Следовательно, для спектра поля помех $N(\omega, \mathbf{r})$ можно записать

$$N(\omega, \mathbf{r}) = \sum_{q=1}^Q \eta(\omega, \boldsymbol{\rho}_q) G(\omega, \mathbf{r}/\boldsymbol{\rho}_q), \quad (9)$$

где $\eta(\omega, \boldsymbol{\rho}_q)$ – спектр излучения в точке $\boldsymbol{\rho}_q$ расположения q -го источника помех; $G(\omega, \mathbf{r}/\boldsymbol{\rho}_q)$ – функция Грина источника.

На основе представления (9) можно записать функцию пространственной корреляции поля помех:

$$\begin{aligned} K_N(\omega; \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \langle N(\omega, \mathbf{r}_1) N^*(\omega, \mathbf{r}_2) \rangle = \\ = \sum_{q_1=1}^Q \sum_{q_2=1}^Q g_N(\omega; \boldsymbol{\rho}_{q_1}, \boldsymbol{\rho}_{q_2}) \times \\ \times G(\omega, \mathbf{r}_1/\boldsymbol{\rho}_{q_1}) G^*(\omega, \mathbf{r}_2/\boldsymbol{\rho}_{q_1}), \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$g_N(\omega; \boldsymbol{\rho}_{q_1}, \boldsymbol{\rho}_{q_2}) = \langle \eta(\omega, \boldsymbol{\rho}_{q_1}) \eta^*(\omega, \boldsymbol{\rho}_{q_2}) \rangle \quad (11)$$

взаимный спектр источников помех.

Выражения (9), (10) создают основу для решения задач имитации поля помех и анализа эффективности систем обработки сигналов. Необходимая для применения этих соотношений матрица Грина $G(\omega, \mathbf{r}/\boldsymbol{\rho}_q)$ может быть рассчитана в зависимости от диапазона частот одним из указанных выше методов.

3. ОПТИМИЗАЦИЯ МИКРОФОННЫХ АНТЕНН

В общем случае оптимизация пространственно-временной обработки речевых сигналов представляет собой чрезвычайно сложную задачу, что обусловлено их существенной нестационарностью и широкополосностью. Поэтому реальные системы обработки речевых сигналов обычно построены с учетом некоторых упрощающих предположений. Одним из таких предположений является допущение о том, что на малых временных интервалах длительностью $10 \div 20$ мс нестационарностью сигнала можно пренебречь.

Основываясь на данном предположении, обработку речевого сигнала обычно выполняют [4] путем сегментации входной реализации на последовательность временных интервалов – фреймов. На каждом фрейме соответствующий отрезок реализации сигнала обрабатывают так, как если бы сигнал был стационарен. Нестационарность же сигнала учитывают путем изменения параметров обработки от фрейма к фрейму.

Применим указанный подход к рассматриваемой задаче. Пусть $U(\omega, \mathbf{r}_p)$ – спектр Фурье поля речевого сигнала, вычисленный на текущем фрейме для точки наблюдения с координатами \mathbf{r}_p , $p = 1, \dots, P$. Кроме полезного сигнала, на вход микрофонной антенны воздействуют внешняя акустическая помеха и собственные электрические шумы приемного тракта. Таким образом, модель

наблюдений для рассматриваемой задачи имеет вид:

$$U(\omega, \mathbf{r}_p) = U_S(\omega, \mathbf{r}_p) + U_N(\omega, \mathbf{r}_p) + U_n(\omega, \mathbf{r}_p), \quad (12)$$

где U_S , U_N и U_n – соответственно поле речевого сигнала, поле внешних акустических помех и поле электрических шумов, пересчитанное ко входу микрофонной антенны. Корреляционные характеристики внешних акустических помех могут быть рассчитаны по методике, изложенной выше. Электрические шумы приемного тракта полагаются некоррелированными между каналами приема.

Далее предположим, что максимально возможная задержка по сигналу между наиболее удаленными точками микрофонной антенны много меньше интервала анализа, т. е.

$$L_{\max}/c \ll T, \quad (13)$$

где L_{\max} – максимальный размер приемной апертуры; c – скорость звука, T – длительности фрейма. Разумеется, данное предположение накладывает определенные ограничения на размер приемной апертуры. Однако нетрудно видеть, что при указанных выше типовых длительностях фреймов и с учетом скорости звука в воздухе ($c = 340$ м/с) размеры приемной апертуры микрофонной антенны для условий автомобильной кабины оказываются вполне приемлемыми даже с учетом такого ограничения.

Важным следствием предположения (13) является возможность разделения [5] пространственно-временной обработки сигналов с выходов микрофонной антенны на последовательность двух процедур:

- пространственную обработку, выполняемую в соответствии с алгоритмом

$$u(\omega) = \sum_{p=1}^P L^*(\omega, \mathbf{r}_p) U(\omega, \mathbf{r}_p), \quad (14)$$

где $L(\omega, \mathbf{r}_p)$ – амплитудно-фазовое распределение на приемной апертуре, вид которого определен ниже; индекс * обозначает комплексное сопряжение;

- фильтрацию сигнала на выходе устройства пространственной обработки, которая сводится к умножению спектра на некоторую весовую функцию $H(\omega)$:

$$\hat{S}_0(\omega) = H(\omega) u(\omega), \quad (15)$$

где $\hat{S}_0(\omega)$ – оценка передаваемого сигнала.

При оптимальной обработке весовые функции L , H должны выбираться вполне определенным образом. Однако алгоритм (14), (15) допускает и более широкую трактовку. В частности, предположим, что вид амплитудно-фазового распределения $L(\omega, \mathbf{r}_p)$ задан некоторым произвольным образом, а частотная характеристика фильтра $H(\omega)$ выбирается так, чтобы минимизировать среднеквадратическую погрешность оценивания переданного сигнала, т. е.

$$\varepsilon(\omega) = \langle |S_0(\omega) - \hat{S}_0(\omega)|^2 \rangle \xrightarrow{H} \min. \quad (16)$$

Решение этой вариационной задачи с учетом структуры оценки (15) имеет вид

$$H(\omega) = \frac{\langle u(\omega) S_0(\omega) \rangle}{\langle |u(\omega)|^2 \rangle}. \quad (17)$$

Таким образом, частотная характеристика фильтра (15) определяется статистическими характеристиками спектра напряжения на выходе устройства пространственной обработки (14). Эти характеристики несложно получить, используя принятую модель наблюдений. В результате, для частотной характеристики (17) имеем

$$H(\omega) = \frac{g_S(\omega) D_S(\omega)}{g_S(\omega) |D_S(\omega)|^2 + g_N^A(\omega)}, \quad (18)$$

где $g_S(\omega)$ – спектр мощности сигнала в точке излучения;

$$D_S(\omega) = \sum_{p=1}^P L^*(\omega, \mathbf{r}_p) G_S(\omega, \mathbf{r}_p) \quad (19)$$

параметр, отражающий суммарное влияние условий распространения звука и пространственной обработки на спектральные характеристики сигнала¹; $G_S(\omega, \mathbf{r}_p)$ – функция Грина для источника речевого сигнала;

$$g_N^A = g_n(\omega) \sum_{p=1}^P |L(\omega, \mathbf{r}_p)|^2 + \sum_{p_1=1}^P \sum_{p_2=1}^P L^*(\omega, \mathbf{r}_{p_1}) \times \times K_N(\omega; \mathbf{r}_{p_1}, \mathbf{r}_{p_2}) L(\omega, \mathbf{r}_{p_2}) \quad (20)$$

суммарный спектр мощности помех на выходе устройства пространственной обработки; $g_n(\omega)$ –

¹Для однородной безграничной среды параметр (19) совпадает с ненормированной диаграммой направленности антенны.

спектр мощности собственных шумов приемного тракта; $K_N(\omega; \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ – корреляционная матрица помех на приемной апертуре.

При выборе весовой функции фильтра, согласно соотношению (18), ошибка фильтрации (16) может быть представлена в виде

$$\varepsilon(\omega) = \frac{g_S(\omega)}{1 + \mu(\omega)}, \quad (21)$$

где

$$\mu(\omega) = \frac{g_S(\omega)|D_S(\omega)|^2}{g_N^A} \quad (22)$$

параметр, численно равный отношению между средней мощностью сигнала и помех после этапа пространственной обработки.

Как следует из выражения (21), ошибка фильтрации тем меньше, чем больше параметр (22). Можно показать, что максимум отношения сигнал/помеха (22) обеспечивается при выборе амплитудно-фазового распределения согласно уравнению

$$\sum_{p_2=1}^P (K_N(\omega; \mathbf{r}_{p_1}, \mathbf{r}_{p_2}) + g_n(\omega)\delta_{p_1 p_2}) \times L_0(\omega, \mathbf{r}_{p_2}) = G_S(\omega, \mathbf{r}_{p_1}). \quad (23)$$

Для того, чтобы найти весовую функцию $L(\omega, \mathbf{r}_p)$, пользуясь уравнением (23), необходимо точно знать корреляционные характеристики помех и функцию Грина по сигналу $G_S(\omega, \mathbf{r})$. На практике такая информация в большинстве случаев отсутствует. Поэтому при реализации пространственной обработки обычно применяют квазиоптимальные и неоптимальные алгоритмы. Так, традиционный диаграммоформирующий метод состоит в фазировании микрофонных антенн для приема плоской волны, приходящей из заданного направления. Этому алгоритму соответствует распределение

$$L_t(\omega, \mathbf{r}_p) = \exp(-j\frac{\omega}{c}(\boldsymbol{\alpha}_0, \mathbf{r}_p)), \quad (24)$$

где $\boldsymbol{\alpha}_0$ – единичный вектор направления прихода сигнала; (\cdot, \cdot) – символ скалярного умножения векторов.

Другой класс алгоритмов использует адаптивную обработку с оцениванием неизвестных характеристик помех [6]. В частности, при реализации обработки в спектральной области одним из наиболее эффективных является алгоритм Кэйпона (J. Capon) [7]. Этому алгоритму соответствует распределение, которое формируется в два этапа.

Вначале следует решить уравнение

$$\sum_{p_2=1}^P \hat{K}_N(\omega; \mathbf{r}_{p_1}, \mathbf{r}_{p_2})L(\omega, \mathbf{r}_{p_2}) = V(\omega, \mathbf{r}_{p_1}), \quad (25)$$

где $\hat{K}_N(\cdot)$ – оценка пространственной корреляции помех, полученная в процессе адаптации. Затем решение уравнения (25) нормируется с тем, чтобы избежать подавления полезного сигнала [6]:

$$L_C(\omega, \mathbf{r}) = \frac{L(\omega, \mathbf{r})}{\sum_{p=1}^P L(\omega, \mathbf{r}_p)V^*(\omega, \mathbf{r}_p)}. \quad (26)$$

В этих соотношения $V(\omega, \mathbf{r}_p)$ – некоторая волновая функция, которая может задаваться произвольно и отражает степень априорного знания структуры поля сигнала. В частности, при полной априорной информации $V(\omega, \mathbf{r}_p) = G_S(\omega, \mathbf{r}_p)$, т. е. совпадает с функцией Грина. Если же на основе некоторых априорных представлений сигнал в пространстве можно считать остро направленным волновым пучком, близким по своей структуре к плоской волне, то тогда принимают

$$V(\omega, \mathbf{r}_p) = \exp(-j\frac{\omega}{c}(\boldsymbol{\alpha}_0, \mathbf{r}_{p_1})), \quad (27)$$

где $\boldsymbol{\alpha}_0$ – ожидаемое направление прихода максимума энергии сигнала.

Возможны и более сложные варианты адаптивной обработки со множественными ограничениями [6], когда ожидаемый сигнал представляется совокупностью волновых пучков (лучей), перекрывающий заданный сектор обзора. Тогда вместо одного уравнения (25) необходимо решать систему таких уравнений для каждого из волновых пучков. Соответственно усложняется и алгоритм нормирования, который в этом случае представляет собой некоторую матричную форму [6].

4. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе описанных выше алгоритмов моделирования звукового поля и работы микрофонных антенн в кабине автомобиля было разработано соответствующее программное обеспечение. Программный пакет обеспечивает графический ввод геометрической модели кабины на основе параметров реального автомобиля. Одновременно вводятся частотные характеристики поглощения звука облицовочными материалами, феноменологическая модель источника шума с его спектральными и пространственно-корреляционными характеристиками. Контрольный звуковой сигнал вводится

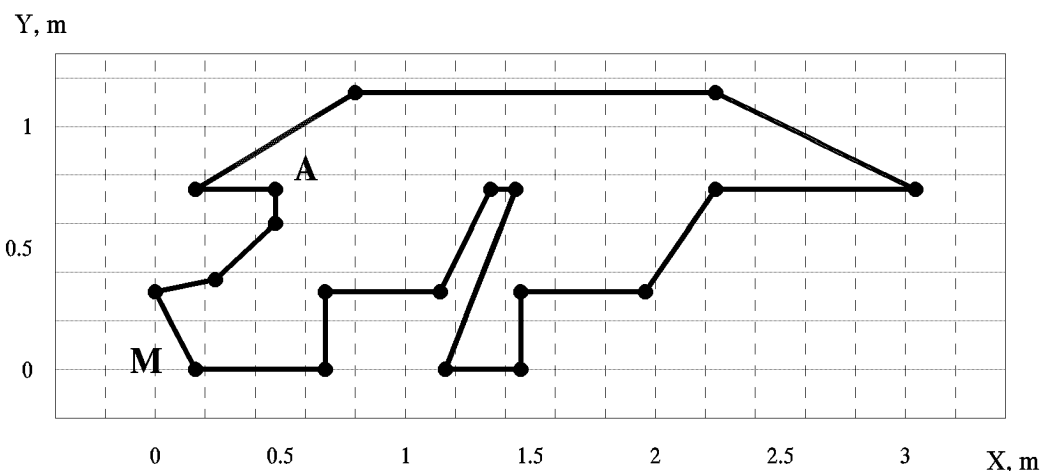


Рис. 1. Аппроксимация профиля кабины в вертикальной плоскости

либо непосредственно с микрофона, либо считывается из библиотеки звуковых файлов.

Такие параметры расчета как частота разделения, количество конечных элементов (при волновом расчете), максимальный порядок отражений (при расчете по методу мнимых источников) регулируются пользователем, исходя из требуемой точности вычислений. Пользователь также может выбрать геометрию и параметры микрофонной антенны, алгоритмы пространственно-временной обработки. Эффективность того или иного варианта обработки оценивается как по объективным, так и по субъективным критериям. В первом случае с этой целью вычисляется отношение сигнал/помеха (22) как функция частоты в пределах заданного диапазона. Субъективная оценка формируется в результате прослушивания имитированных реализаций речи на выходе системы обработки. Эти реализации выводятся в виде стандартных звуковых файлов и могут быть также использованы в качестве контрольных для проверки работоспособности систем речевого управления.

С использованием данного программного пакета были проведены некоторые расчеты. Первая группа расчетов преследовала цель установить, насколько верно имитированные звуковые сигналы отображают основные черты реальных звуковых сигналов, которые можно наблюдать в эксперименте. Другая группа расчетов была посвящена оценке эффективности некоторых алгоритмов пространственно-временной фильтрации сигнала речи на фоне шума. Для проведения расчетов была принята геометрическая модель кабины реального автомобиля (“Ford” с кузовом типа “седан”). Аппроксимированный профиль кабины в

сечении вертикальной плоскостью представлен на рис. 1. Частотные зависимости поглощения звука различными фрагментами поверхностей были назначены, исходя из справочных данных. Моделировались сигнал речи водителя и шум двигателя. При этом предполагалось, что распределенный источник шума двигателя можно заменить 12 точечными источниками, размещенными на поверхности, отмеченной на рис. 1 буквой *M*. Предполагалось, что радиус взаимной корреляции источников уменьшается с ростом частоты. Источник сигнала речи был аппроксимирован точечным источником, расположенным на уровне головы водителя. При исследовании микрофонных антенн в качестве местоположения антенны была выбрана поверхность, отмеченная на рис. 1 буквой *A*.

4.1. Проверка адекватности алгоритма моделирования

При тестировании алгоритма моделирования и соответствующего ему программного обеспечения важнейшим является вопрос о критерии адекватности процедуры моделирования. Анализ геометрической и математической моделей, положенных в основу моделирования, указывает на отличия модели от реального объекта (что, заметим, типично для любого вида моделирования). Поэтому, сопоставляя параметры имитированных и наблюдаемых в эксперименте звуковых полей, мы не можем рассчитывать на совпадение их “тонкой структуры”. Заметим, однако, что такое совпадение и не требуется. Известно, что требуемая степень близости модели к объекту определяется чувствительностью устройств, взаимодействующих с

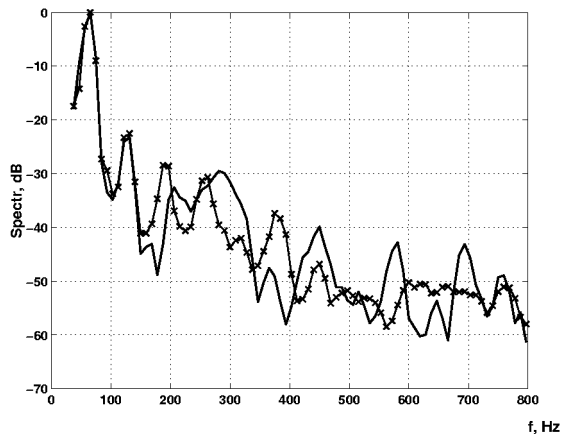


Рис. 2. Спектры натурального и имитированного звуков:

сплошная – расчет, маркированная – эксперимент

объектом или его моделью, к тем или иным параметрам объекта. В рассматриваемом случае смесь сигналов речи и шума в конечном итоге воспринимается либо слуховым аппаратом человека (в системах связи), либо устройствами распознавания речи (в системах управления). На промежуточном этапе работы системы указанные поля воспринимаются микрофонной антенной. В этом контексте представляется важным соответствие реального и имитированного сигналов по следующим показателям:

- отображение сложной пространственной структуры поля сигнала и помехи с учетом характерных направлений прихода сигналов к антенне, их задержек и амплитудных соотношений;
- общий характер зависимости усредненной спектральной плотности мощности помехи от частоты.

Названные показатели существенны при разработке микрофонных антенн. Что касается слухового восприятия, то для него требования к модели, по-видимому, еще более смягчаются.

Для тестирования предлагаемого алгоритма симуляции звука был проведен следующий эксперимент. В автомобиле с включенным двигателем были установлены вибродатчик (в одной из точек поверхности M) и микрофон (вблизи от поверхности A). Датчик вибраций закреплялся на внутренней поверхности корпуса автомобиля недалеко от педали газа с помощью магнитного крепления. В этом режиме обеспечивается измерение скорости

вибраций с погрешностью не более 1 дБ в диапазоне частот от 1 до 4000 Гц. Конденсаторный микрофон, входящий в состав стандартного шумомера, обладает равномерной частотной характеристикой в диапазоне частот от 20 до 10000 Гц. Способ установки микрофона обеспечивал его защиту от проникновения вибраций. Сигналы с выхода вибродатчика (пропорциональные скорости колебаний) и с выхода микрофона были синхронно записаны в память компьютера в виде звуковых файлов в формате *wav*. Из полученных последовательностей были выбраны участки длительностью около 14 с, для которых случайный сигнал вибраций и соответствующий ему звук можно было рассматривать как стационарные случайные процессы. Мгновенный амплитудный спектр вибраций накладывался на равномерные спектры независимых случайных последовательностей (по числу точечных источников, имитирующих распределенный источник шума), генерируемых компьютерной программой. В результате усредненный спектр каждой из независимых шумовых последовательностей соответствовал усредненному спектру записанного отрезка вибрационного шума в месте закрепления датчика. Затем из набора независимых случайных последовательностей формировался (на основе преобразования Холецкого) набор последовательностей с заданными коэффициентами взаимной корреляции, соответствующими феноменологическим представлениям о пространственной корреляции на источнике для каждой из частот спектра. Предполагалось, что радиус пространственной корреляции на источнике уменьшается с ростом частоты.

Полученные коррелированные случайные последовательности служили исходными данными для программы имитации звукового сигнала в точке, где при проведении эксперимента размещался микрофон. Так как основная энергия сигнала вибраций сосредоточена на сравнительно низких частотах, то в программе имитации при вычислении матрицы Грина использовался волновой подход. Сравнению подвергались усредненные спектры мощности имитированного сигнала и сигнала на выходе микрофона. Графики спектров, нормированные к максимальным значениям, приведены на рис. 2. Спектр имитированного звука оказался более неравномерным в верхней области частот исследованного диапазона, однако общая тенденция изменения спектров с частотой сохранялась. Близкий характер изменения спектров натурального и имитированного звуков позволил сделать вывод о возможности применения разработанного программного обеспечения в качестве имитатора

звуковых сигналов в кабине автомобиля.

4.2. Исследование эффективности микрофонных антенн

В этом подразделе приведены некоторые численные примеры, иллюстрирующие возможности предлагаемой методики для оптимизации параметров микрофонной антенны и алгоритма пространственно-временной обработки в условиях автомобильной кабины. Важной специфической особенностью данной задачи, влияющей на эффективность применения микрофонной антенны, являются относительно малые общие размеры кабины, которые составляют от единиц (низкие частоты) до нескольких десятков (высокие частоты) длин волн. Подобная ситуация для теории пространственно-временной обработки акустических сигналов весьма нетипична [5]. Традиционные модели акустических сигналов, для которых в основном развивалась эта теория, предполагают, как правило, наличие одной или нескольких координат, вдоль которых область пространства, где распространяется звук, можно было бы считать достаточно протяженной (а с учетом поглощения звука – практически бесконечной). В рамках этого допущения справедливы представления о поле сигнала, как об узконаправленных в тех или иных плоскостях волновых пучках. Соответственно, обычно применима и традиционная концепция направленности антенн.

В случае кабины автомобиля ситуация принципиально иная. Если обратиться к картине мнимых источников как к более наглядной, то видно, что поле на приемной апертуре микрофонной антенны, установленной в кабине, создается большой совокупностью источников, распределенных по широкому диапазону направлений. Эту ситуацию иллюстрирует рис. 3, на котором представлена условная картина мнимых источников для рассматриваемого численного примера. На этом рисунке каждый дискрет соответствует одиночному мнимому источнику или группе близко расположенных источников. Позиция дискретов определяется азимутом (углом в горизонтальной плоскости ϕ) и углом места (углом в вертикальной плоскости θ), под которыми наблюдается соответствующий мнимый источник из фазового центра микрофонной антенны. Уровень дискрета соответствует вкладу (в дБ) соответствующего источника в общее поле сигнала в точке приема. Из рис. 3 видно, что по азимуту источники практически равномерно заполняют диапазон углов от -90° до $+90^\circ$, а по углу места основная энергия источников со-

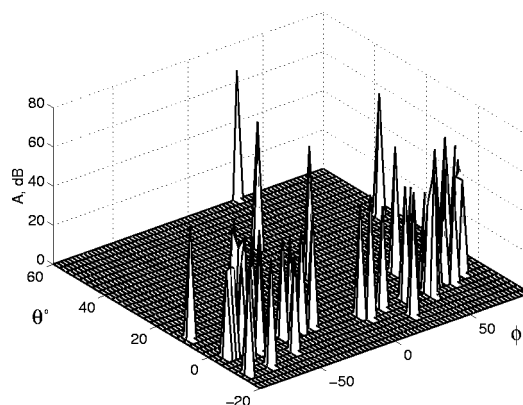


Рис. 3. Распределение мнимых источников по направлениям

средоточена в секторе $\pm 20^\circ$. Кроме того, среди источников нельзя выделить несколько превалирующих по уровню: общая энергия поля сигнала сильно “раздроблена” по широкому диапазону направлений. В этой ситуации, очевидно, бессмысленно разделять принимаемое поле на прямой и отраженный сигналы: практически все значимые в энергетическом отношении сигналы сформированы при воздействии границ среды. Основываясь на этой картине, можно предположить, что традиционная диаграммоформирующая техника для такого поля будет неэффективной. Количественное подтверждение данного вывода будет дано ниже. Прежде этого проанализируем особенности формирования поля помех.

В соответствии с рассмотренной в предыдущем разделе моделью источника шума поле помех образуется совокупностью распределенных в пространстве источников. Если источники полностью когерентны, то тем же свойством будет обладать и создаваемое ими на приемной апертуре поле помех. Это наиболее благоприятная ситуация для применения методов оптимальной пространственной обработки, эффективность которой, как известно [5], тем выше, чем выше коррелированность помех между точками приема. Однако реально когерентность источников может быть весьма ограниченной. В этой ситуации принципиальное значение приобретает вопрос о том, достаточной ли с точки зрения эффективности оптимальной или адаптивной пространственной обработки будет коррелированность поля помех.

Заметим, что радиус пространственной корреляции поля помех на апертуре микрофонной антенны определяется как характеристиками источ-

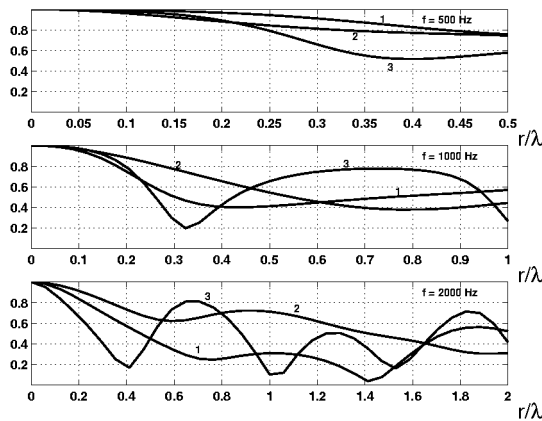


Рис. 4. Функция пространственной когерентности поля помех на апертуре 0.34 м:
1 – вдоль оси X , 2 – вдоль оси Y , 3 – вдоль оси Z

ников, так и условиями распространения звука. Возможное уменьшение корреляции помех на приемной апертуре (декорреляция) в значительной мере определяется разбросом задержек распространения шума от каждого из источников к различным элементам микрофонной антенны: чем этот разброс больше, тем значительней и декорреляция. Естественно, что это обстоятельство является наиболее существенным для верхней части диапазона частот.

В условиях автомобильной кабины в силу ее относительно малых волновых размеров в большинстве случаев реализуются небольшие разности времен прихода (доли мс). Кроме того, основная энергия помех, возникающих при движении автомобиля, сосредоточена, как правило, в области частот ниже 1000 Гц. Поэтому есть основания полагать, что даже при значительном нарушении когерентности источников пространственная корреляция помех в пределах ограниченных апертур и для существенной в энергетическом отношении части частотного диапазона может быть довольно высокой. Подтверждением данного предположения могут служить графики функции пространственной когерентности поля помех, представленные на рис. 4 для частот 500, 1000 и 2000 Гц. Эти функции рассчитаны для модели полностью некогерентных источников помех. Как следует из рисунков, на частотах до 1000 Гц и в пределах апертур порядка длины волны сохраняется достаточно высокая коррелированность поля помех.

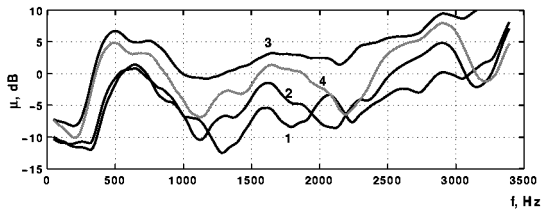
Таким образом, предварительный анализ особенностей сигнально-помеховой обстановки в кабине автомобиля показывает, во-первых, слож-

ность и некоторую нетрадиционность задач оптимизации пространственной обработки сигнала на апертуре микрофонной антенны в рассматриваемых условиях. Во-вторых, этот анализ все же дает основания надеяться на эффективность применения методов оптимальной и адаптивной пространственной обработки.

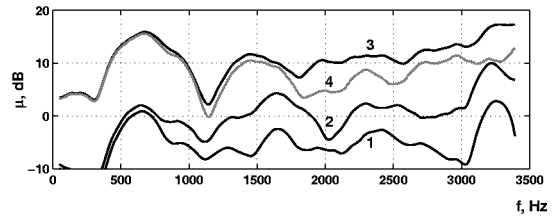
Перейдем к непосредственному анализу эффективности алгоритмов пространственной обработки. Прежде всего рассмотрим результаты расчета объективного показателя (22). Расчет этого показателя выполнялся для микрофонной антенны, состоящей из пяти микрофонов, размещенных в линию с шагом 3 см. Необходимый для расчетов спектр мощности шума $g_N(\omega)$ был взят из экспериментальных данных (см. рис. 2). Спектр мощности сигнала соответствовал усредненному спектру речи, приведенному в работе [8]. Расчеты выполнялись для двух предельных моделей когерентности источников шума, когда источники либо полностью некогерентны, либо полностью когерентны.

На рис. 5 и 6 показаны зависимости отношения сигнал/помеха (22) от частоты для четырех вариантов обработки: одиночного ненаправленного микрофона (кривые 1); микрофонной антенны с традиционным амплитудно-фазовым распределением (24) (кривые 2); той же микрофонной антенны, но с оптимальным амплитудно-фазовым распределением, выбранным согласно уравнения (23) (кривые 3); микрофонной антенны с амплитудно-фазовым распределением, соответствующим алгоритму Кэйпона при выборе правой части уравнения (25) согласно соотношения (27) (кривые 4). При этом рис. 5 соответствует ориентации микрофонной антенны вдоль оси Z , т.е. фронтально по отношению к источникам помех, рис. 6 – ориентации микрофонной антенны вдоль оси X , т.е. в продольном направлении.

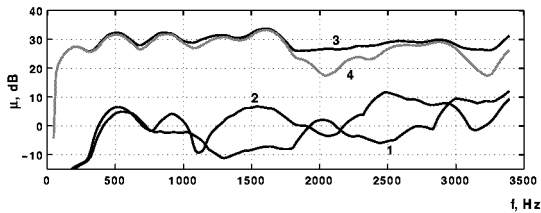
Анализ представленных результатов позволяет сделать следующие выводы. Прежде всего видно, что в рассматриваемых условиях распространения звука традиционная диаграммоформирующая техника работает неэффективно: во всех представленных ситуациях выигрыш за счет применения микрофонной антенны с амплитудно-фазовым распределением, определяемой выражением (24), по сравнению с одиночным микрофоном составляет лишь несколько дБ. В то же время, при оптимальном амплитудно-фазовом распределении улучшение за счет применения микрофонной антенны по сравнению с одиночным микрофоном может достигать 15–20 дБ. Правда, эффективность оптимизации существенно зависит от модели ис-



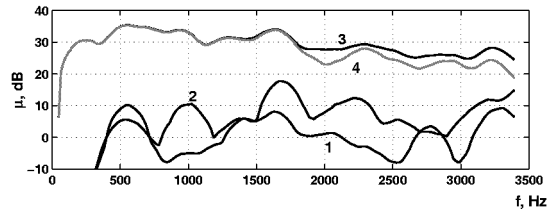
а



а



б



б

Рис. 5. Сравнительная эффективность алгоритмов пространственной обработки (антенна ориентирована вдоль оси Z):

а – источники помех некогерентны,
б – источники помех когерентны

Рис. 6. Сравнительная эффективность алгоритмов пространственной обработки (антенна ориентирована вдоль оси X):

а – источники помех некогерентны,
б – источники помех когерентны

точников помех: для когерентных источников помехи она наиболее высока, для некогерентных – заметно ниже. В последнем случае эффективность оптимальной обработки существенно зависит от ориентации антенны: при фронтальной к источникам помех ориентации (рис. 5) она невысока, а при продольной ориентации (рис. 6) – заметно лучше и достигает по сравнению с одиночным микрофоном 15 дБ на низких частотах и 5–7 дБ на высоких.

Ухудшение эффективности оптимизации в верхней части частотного диапазона объясняется, по-видимому, снижением пространственной корреляции помех (см. рис. 4). Зависимость же эффективности оптимизации от ориентации антенн можно объяснить неоднородностью и анизотропией поля помех, а также различием в направленности микрофонной антенны, которая формируется в результате выполнения оптимальной пространственной обработки. Во всех рассмотренных случаях предполагалось, что полезный речевой сигнал приходит из продольного направления кабины (вдоль оси X). При этом, как показано на рис. 3, сигнал практически равномерно распределен во всем секторе азимутальных углов. При фронтальной ориентации микрофонной антенны сужение направленности с целью подавления помех сопровождается также потерей части энергии сигнала, поэтому в целом эффективность оптимизации оказывается невысокой. При продоль-

ной же ориентации антенна по сигналу направлена слабо, в то время как помеха может быть эффективно подавлена. Заметим, что результаты, близкие к представленным на рис. 6, были получены и для ориентации микрофонной антенны вдоль оси Y , т. е. в вертикальном направлении.

Таким образом, анализ показывает, что для определенных условий оптимизация пространственной обработки на апертуре микрофонной антенны, установленной в кабине автомобиля, может быть достаточно эффективной. Однако практическая реализация оптимальной обработки наталкивается на проблему априорной неопределенности относительно характеристик поля сигнала и помех. В самом деле, функция Грина в действительности неизвестна, так как любая расчетная модель основана на некоторых приближениях. Кроме того, условия в кабине могут изменяться. Например, меняется количество пассажиров или их местоположение. Подвержены изменчивости также источники помех. Все эти факторы заранее учесть невозможно.

Решение указанной проблемы может быть найдено за счет привлечения методов адаптивной обработки, суть которой состоит в оценивании неизвестных характеристик наблюдаемого поля и последующем использовании полученных оценок для оптимизации параметров обработки. Адаптация к изменению структуры поля помех мо-

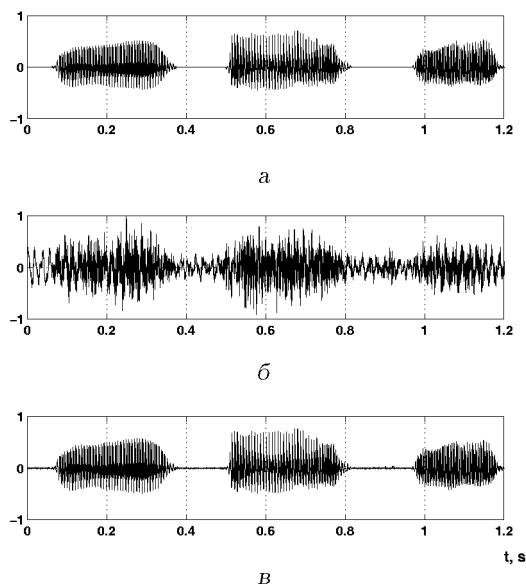


Рис. 7. Результаты имитационного эксперимента по очистке речевого сигнала:

а – чистый сигнал на одиночном микрофоне,
 б – смесь сигнала и помехи на одиночном микрофоне,
 в – сигнал на выходе системы обработки

жет быть выполнена относительно просто. Адаптация к изменению поля сигнала, в принципе, возможна, но требует дополнительных технических решений, например, периодического тестирования условий распространения специальными контрольными сигналами. Поэтому представляет интерес анализ упрощенных подходов. Один из них заключается в использовании волновых функций типа (27) вместо соответствующей функции Грина. Можно предположить, что при небольших апертурах такая замена не приведет к большим потерям эффективности. Подтверждением данному предположению могут служить результаты расчета для алгоритма Кэйпона, которые представлены на тех же рис. 5, 6 (кривые 4). Из графиков видно, что для когерентной модели источников помех эффективность амплитудно-фазового распределения, полученного в результате решения уравнения (25), при выборе правой части в виде (27) близка к оптимальной. Такой приближенный подход позволяет получить достаточно высокую эффективность и в том случае, когда источники шума некогерентны при условии, что антенна ориентирована в продольном направлении (рис. 6, а).

Представленные результаты иллюстрируют лишь некоторые возможности предлагаемой методики и программного обеспечения для объективно-

го анализа эффективности акустического интерфейса в кабине автомобиля. Аналогичным образом могут решаться вопросы оптимизации размещения микрофонной антенны, ее геометрии, числа микрофонов, шага решетки, задачи подавления помех различного происхождения и т. п.

Наряду с объективными характеристиками, предлагаемая методика позволяет производить и субъективную оценку качества обработки, что в задачах речевой связи имеет важнейшее значение. С этой целью, как указывалось выше, предусмотрена имитация реализаций сигнала и шума на выходе систем обработки. Результаты имитационного эксперимента по очистке речи показаны на рис. 7.

На верхней дорожке этого рисунка представлены результаты имитации речевого сигнала на выходе одиночного ненаправленного микрофона при отсутствии помех. Сигнал был сформирован по указанной в разделе 2 методике из реализации реального речевого сигнала, записанного в студийных условиях. Аналогичным образом имитировалась помеха, порожденная шумом двигателя, смесь которой с сигналом показана на второй дорожке рис. 7. Наконец, на нижней дорожке показаны результаты обработки реализации наблюдаемого поля по алгоритмам (14), (15) для оптимального амплитудно-фазового распределения, полученного в результате решения уравнения (23). Качество очистки речи может быть оценено путем непосредственного прослушивания имитационных реализаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика и программное обеспечение для расчета и имитации звуковых полей в кабине автомобиля, которые имеют ряд отличительных особенностей по сравнению с известными программами анализа звуковых полей в помещениях. К числу таких особенностей относятся:

- 1) использование волнового и лучевого методов расчета звукового поля соответственно в поддиапазонах нижних и верхних частот;
- 2) возможность задания сложной геометрии кабины и произвольной частотной зависимости поглощающих свойств ее внутренних поверхностей;
- 3) вычисление корреляционных характеристик помехи на апертуре микрофонной антенны с

учетом распределенного характера источников помех и ограниченности радиуса их пространственной корреляции.

Кроме расчета звукового поля, предлагаемое программное обеспечение позволяет проводить анализ эффективности алгоритмов пространственно-временной обработки речевых сигналов, а также непосредственную имитацию реализаций полей сигнала и помех как на апертуре микрофонной антенны, так и на выходе систем сигнальной обработки.

Указанные отличительные особенности позволяют надеяться, что данные методика и программный пакет могут служить удобным инструментом при выполнении проектирования систем речевого интерфейса для автомобильных применений, а также могут использоваться для решения родственных по содержанию задач, в которых структура полей сигнала и помех формируется под влиянием замкнутых объемов, ограниченных поверхностями сложной формы, поглощающие свойства которых зависят от частоты.

1. *Kettler F., Gierlich H. W., Krebber W.* Hands-free car kits – a performance discussion of “state of the art” solutions // Collect. Pap. 137-th meet. ASA and 2-nd conv. EAA.– Berlin, 1999 (on CD-ROM).
2. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров.– М.: Наука, 1970.– 720 с.
3. *Dance S. M., Shield B. M.* The comparison of five computer models for the prediction of sound propagation in industrial rooms // Collect. Pap. 137-th meet. ASA and 2-nd conv. EAA.– Berlin, 1999 (on CD-ROM).
4. *Рабинер Л. Р., Шафер Р. В.* Цифровая обработка речевых сигналов.– М.: Радио и связь, 1981.– 496 с.
5. *Ильичев В. И., Калюжный А. Я., Красный Л. Г., Лапий Ю. В.* Статистическая теория обнаружения гидроакустических сигналов.– М.: Наука, 1992.– 415 с.
6. *Монзинго Р. А., Миллер Т. У.* Адаптивные антенные решетки.– М.: Радио и связь, 1986.– 448 с.
7. *Capon J., Greenfield R. J., Kolker R. J.* Multi-dimensional maximum-likelihood processing of a large aperture seismic array // Proc. IEEE.– 1967.– 55.– P. 192–217.
8. *Byrne D. et al.* An international comparison of long-term average speech spectra // J. Acoust. Soc. Amer.– 1994.– 96.– P. 2108–2120.