

УДК 534.834.7:534.864

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ ДЛЯ РАСЧЕТА СИСТЕМ ЗВУКОУСИЛЕНИЯ В ПОМЕЩЕНИИ

В. Б. ГАЛАНЕНКО\*, В. В. КРАВЧЕНКО\*\*, Б. И. ШОЦКИЙ\*

\* *Национальный технический университет Украины “КПИ”, Киев*\*\* *Управление делами Аппарата Верховной Рады Украины, Киев**Получено 11.02.2000 ◊ Пересмотрено 27.12.2000*

Предложен способ расчета систем звукоусиления в помещении, основанный на компьютерном моделировании звукового поля с учетом частотной зависимости чувствительности и направленности громкоговорителей, геометрии помещения, а также частотных зависимостей звукопоглощения его поверхностей. Разработано соответствующее программное обеспечение. Исследованы рабочие параметры распределенной системы индивидуальных громкоговорителей, расположенных на рабочих местах слушателей. Показано, что формирование акустических свойств в каждой из точек “звукового покрытия” обеспечивается за счет вкладов значительного количества громкоговорителей. Это выражается в изменении уровней и частотных спектров принимаемого сигнала по сравнению с источником.

Запропоновано метод розрахунку систем звукопідсилення в приміщеннях, який базується на комп'ютерному моделюванні звукового поля з урахуванням частотних залежностей чутливості й напрямленості гучномовців, геометрії приміщення, а також частотних залежностей звукопоглинання його поверхонь. Розроблено відповідне програмне забезпечення. Досліджені робочі параметри розподіленої системи індивідуальних гучномовців, розташованих на робочих місцях слухачів. Показано, що формування акустичних властивостей у кожній з точок “звукового покриття” забезпечується за рахунок внесків значної кількості гучномовців. Це виражається в зміні рівнів та частотних спектрів прийнятого сигналу в порівнянні з тим, що виходить від джерела.

The method of a room insonation system design is proposed. It is based on the computer simulation of the sound field within a room, accounting the frequency response of loudspeakers, the frequency dependence of their directivity patterns, the room geometry and the frequency dependent sound absorption of the room surfaces. The respective software is developed. Operating characteristics for an insonation system composed of a lot of the individual loudspeakers are investigated. It is shown that the acoustical properties in every point of the “sound cover” is formed by a considerable number of loudspeakers. This trend is embodied in the change of the received signal levels and spectra, when comparing with that to the emitted by a source.

### ВВЕДЕНИЕ

Акустическое проектирование помещений включает в себя подбор поглощающих материалов, определяющих реверберацию, громкость звука и степень его диффузности. Эффективная корректировка акустических свойств помещений может осуществляться за счет излучателей звука, размещенных в его объеме. Важность электронного оборудования помещений отмечается во многих работах по архитектурной акустике (см., например, [1]). Таким образом, существенным этапом акустического проектирования является подбор необходимого количества излучателей звука (громкоговорителей, акустических систем или звуковых колонок) с соответствующими техническими характеристиками, их размещения и ориентации. Наиболее распространенная инженерная методика [2] решения этой задачи основана на использовании критерия равномерности распределения уровня звукового сигнала на поверхности, где находятся слушатели (так называемого “звукового покрытия”). При этом интенсивность звука в каждой точке упомя-

нутой поверхности рассчитывается методом энергетического суммирования волн, излученных отдельными источниками. В расчет принимается номинальная мощность, индекс звукового давления и характеристика направленности на одной частоте (чаще всего 1000 или 500 Гц).

Несомненным достоинством этой методики является ее простота и относительно малый объем необходимых расчетов. В то же время, при таком подходе остается неучтенным ряд факторов и характеристик, влияющих на конечный результат. Прежде всего, недостаточен сам критерий равномерности “звукового покрытия”, выступающий как единственный в традиционной методике. Еще одной практически важной, но не учитываемой, характеристикой проектируемых систем является способность обеспечить разборчивость и верное воспроизведение тембральной окраски звука. Как правило, проверка этой характеристики проводится экспериментально уже после того, как предлагаемая система смонтирована (так сказать, *in vivo*) и существенные коррекции затруднены. Кроме того, применяемый упрощенный вариант расчета “звукового покрытия” недостаточно на-

дежен, так как не учитывает частотных характеристик излучателей звука, зависимости характеристик направленности от частоты, спектра передаваемого сигнала и влияния эффектов интерференции отдельных спектральных компонент. Не учитываются также отражения звука от ограждающих поверхностей, которые соответствуют начальному участку процесса реверберации. Следует отметить, что именно они, совместно с прямым сигналом, формируют ощущение громкости звука [1] и, следовательно, принимаются во внимание в расчетах “звукового покрытия”.

Цель данной работы состоит в модификации существующей базовой методики, которая позволила бы учесть вышеназванные факторы и характеристики при расчете “звукового покрытия”, а также предоставила бы возможность контроля качества звуковоспроизведения еще на стадии проектирования. В качестве средства решения поставленной задачи выбрано компьютерное моделирование звуковых сигналов в помещении, включающее как непосредственную симуляцию звука, воспроизводимого в помещении системой озвучивания, так и расчет основных параметров звуковоспроизведения (включая и “звуковое покрытие”) с учетом перечисленных выше факторов и характеристик.

Для сопоставления возможных технических решений при проектировании системы озвучивания предлагается использовать в качестве критерия не только степень равномерности “звукового покрытия”, но и степень равномерности частотных характеристик звуковоспроизведения на конкретных местах нахождения слушателей. Кроме того, рекомендуется учитывать субъективные экспертные оценки по результатам прослушивания симулированного звукового сигнала на местах в сравнении с исходным контрольным сигналом, поступающим от микрофона. Как результат, разработан специализированный пакет прикладных компьютерных программ.

В качестве примера применения модифицированной методики исследованы некоторые характеристики звуковоспроизведения, обеспечиваемые распределенной системой индивидуальных громкоговорителей, установленных на рабочих местах слушателей.

## 1. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ

В основе математического алгоритма лежит расчет амплитудно-фазового коэффициента передачи от системы излучателей в точку, где находится слушатель, для каждой из частотных компо-

нент спектра сигнала. Значение этого коэффициента является результатом интерференции волн, создаваемых разными источниками. При наличии отражений в их число следует включить также и мнимые источники первого порядка с поправкой на частотнозависимое поглощение звука соответствующими участками поверхностей. В предположении о том, что  $n$ -ый источник звука излучает сферическую волну с амплитудным распределением по фронту, которое определяется характеристикой направленности  $R_n(\omega, \theta, \varphi)$ , упомянутый коэффициент передачи определяется как

$$Q(\omega, \mathbf{r}) = \sum_{n=1}^N A_n(\omega) \exp(i\omega\tau_n), \quad (1)$$

где

$$A_n(\omega) = \sqrt{W_n} 10^{0.05L_n} K_n(\omega) \frac{R_n(\omega, \theta, \varphi)}{r_n} \times \sqrt{1 - \alpha_n} \exp(-\beta(\omega)r_n); \quad (2)$$

$r_n$  – расстояние от  $n$ -го источника (действительного или мнимого) до слушателя;  $\tau_n = r_n/c$ ;  $\beta(\omega)$  – коэффициент поглощения звука в воздухе;  $\alpha_n(\omega)$  – коэффициент поглощения звука соответствующим участком ограждающей поверхности;  $W_n$  – номинальная электрическая мощность излучателя,  $L_n$  – индекс звукового давления в дБ;  $K_n(\omega)$  – частотная характеристика излучателя, нормированная к значению на частоте 1000 Гц. При наличии в помещении препятствий типа угловых выступов или барьеров величины  $A_n(\omega)$ ,  $\tau_n$  следует определять по формулам, описывающим дифракцию звука [3].

Вычисляя произведение спектра исходного сигнала на частотную зависимость коэффициента передачи и применяя преобразование Фурье для восстановления сигнала во временной области, получаем симулированный сигнал в заданной точке пространства. Для того, чтобы искажения звука, обусловленные дискретизацией сигнала и его спектра, не были существенными, расчет функции  $Q(\omega, \mathbf{r})$ , избыточной узкими интерференционными пиками и провалами, должен быть выполнен на достаточно плотной сетке частот.

При расчете равномерности “звукового покрытия” и частотных характеристик звуковоспроизведения применяется следующий подход. Речевой сигнал рассматривается как стационарный случайный процесс, спектральная характеристика которого отвечает статистически усредненному спектру речи  $S_0(\omega)$  (см., например, [4]). Заметим, что такой сигнал часто используется в качестве контрольного при акустических измере-

ниях в помещении. Принятое предположение позволяет представить сигнал, поданный на излучатель, в виде соответствующего интеграла Фурье–Стилтьеса и получить значение звукового поля в точке, где находится слушатель:

$$p(t, \mathbf{r}) = \int dF(\omega) Q(\omega, \mathbf{r}) \exp(-i\omega t). \quad (3)$$

Здесь  $dF(\omega)$  – некоррелированные на непересекающихся интервалах случайные меры. Вычисляя дисперсию этого случайного процесса для произвольного диапазона частот  $[\omega_1, \omega_2]$  как меру его интенсивности, получаем следующую формулу для уровня звука (в дБ) в заданной точке пространства:

$$L(\mathbf{r}) = 10 \lg \left( \frac{1}{a} \int_{\omega_1}^{\omega_2} S_0(\omega) |Q(\omega, \mathbf{r})|^2 d\omega \right). \quad (4)$$

В этом соотношении нормировочный коэффициент имеет вид

$$a = \int_0^{\infty} S_0(\omega) d\omega.$$

Ввиду значительной изрезанности частотной зависимости коэффициента передачи численный расчет по формуле (4) требует использования очень мелкой сетки частот. Повторение расчета для многих точек пространства приводит к большим вычислительным затратам. Укрупнение же сетки ведет к неверному учету эффектов интерференции. Для того, чтобы обойти эту трудность, целесообразно разбить весь частотный диапазон на поддиапазоны (например, третьоктавные полосы) и принять, что в пределах поддиапазонов такие гладкие частотные зависимости как  $S_0(\omega)$ ,  $\beta(\omega)$ ,  $R_n(\omega, \theta, \varphi)$ ,  $\alpha_n(\omega)$ , могут быть приближенно заменены их средними значениями. После изменения порядка интегрирования и суммирования интегралы по частоте легко вычисляются, и выражение (4) заменяется следующей приближенной формулой:

$$L(\omega_i, \mathbf{r}) = \sum_i S_0(\omega_i) q^2(\omega_i, \mathbf{r}) \Delta\omega_i. \quad (5)$$

Здесь через

$$q^2(\omega_i, \mathbf{r}) = \sum_m \sum_n A_m(\omega_i, \mathbf{r}) \times M_{mn}(\omega_i, \mathbf{r}) A_n(\omega_i, \mathbf{r}) \quad (6)$$

обозначен квадрат амплитудной частотной характеристики звуковоспроизведения в данной точке

помещения, соответствующей измерению анализатором, полоса пропускания которого отвечает принятому разбиению частотного диапазона;

$$M_{mn}(\omega_i, \mathbf{r}) = \frac{\sin(\Delta\omega_i \tau_{mn})}{\Delta\omega_i \tau_{mn}} \cos(\omega_i \tau_{mn});$$

$\tau_{mn} = (r_m - r_n)/c$  – коэффициент взаимной корреляции сигналов от  $m$ -го и  $n$ -го излучателей в полосе частот, соответствующей принятому разбиению.

Формулы (5) и (6) приняты в качестве расчетных при вычислении “звукового покрытия” и частотных характеристик звуковоспроизведения. При этом используется традиционное для акустических измерений в помещении третьоктавное разбиение. В пользу такого выбора разбиения говорит и то, что применяемые в профессиональной аппаратуре частотные корректоры (эквалайзеры) зачастую являются именно третьоктавными. Кроме того, слуховое восприятие человека характеризуется ростом ширины частотных полос, которые формируют восприятие громкости звука, при увеличении центральной частоты. Отметим, что использование стабильной относительной полосы анализа хотя и не соответствует в точности наблюдаемым закономерностям, все же верно отражает эту тенденцию. Из приведенных соотношений видно, что при возрастании центральной частоты полосы интервал корреляции сужается. Следовательно, соответствующие этим полосам сигналы от различных излучателей ближе к некогерентным. В то же время, на низких частотах когерентность увеличивается. Вместе с этим возрастает влияние интерференции.

## 2. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Пакет программ, реализующий описанный алгоритм, состоит из нескольких функциональных блоков. В первом из них осуществляется ввод геометрических параметров помещения, акустических характеристик отражающих поверхностей (извлекаемых из базы данных) и мест нахождения слушателей. Предполагаемое размещение излучателей вводится либо с помощью графического интерфейса (при этом фоном служит план расположения слушателей), либо путем задания координат в числовой форме. Параметры излучателей (тип, номинальная мощность, индекс звукового давления, частотная характеристика, характеристика направленности на разных частотах) извлекаются из базы данных, которая может пополняться пользователем. При проведении расчетов трехмерные характеристики направленности

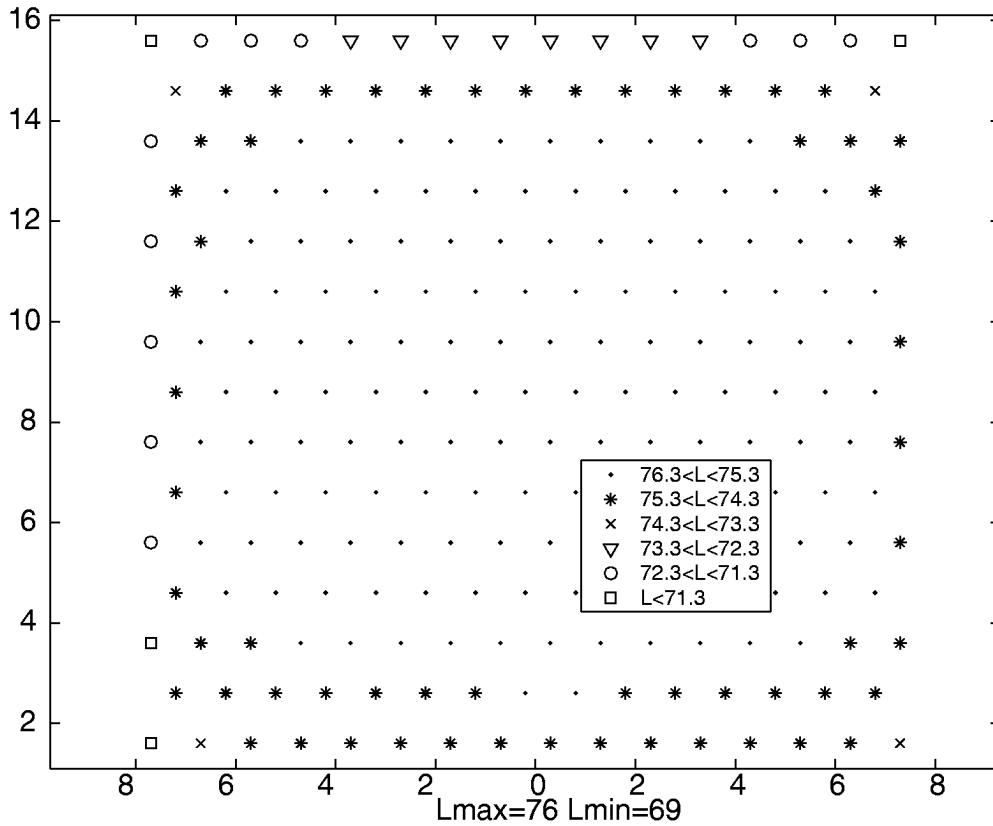


Рис. 1. Распределение уровня звука на местах расположения слушателей (через одно). Расчет проводился при уровне электрического возбуждения, сниженном на 30 дБ по отношению к номинальному

аппроксимируются эллипсоидами, для построения которых необходимо внести в базу данных значения характеристик направленности во фронтальном, двух боковых (горизонтальном и вертикальном) и тыльном направлениях на некоторой сетке частот. Кроме координат излучателей, задаются углы, определяющие ориентацию их акустических осей, а также произвольное изменение уровня электрического возбуждения каждого излучателя по отношению к номинальному.

В программу с помощью микрофона и звуковой карты вводится контрольный звуковой файл.

Во втором функциональном блоке осуществляется расчет частотных характеристик звуковоспроизведения для всех или части мест нахождения слушателей в соответствии с формулой (6), а также интегральный уровень звукового сигнала (формула (5)). Возможны два режима расчета: с учетом первых отражений или без него. Результаты вычислений выводятся в виде двумерного графика “звукового покрытия” и графика усредненной по всем местам слушателей частотной характеристики звуковоспроизведения с указанием границ

отклонения от средней зависимости. Кроме того, предоставляется возможность вывести на экран частотную характеристику для любого места по выбору.

В следующем функциональном блоке создается звуковой файл, симулирующий звучание контрольного сигнала на выбранном с помощью графического интерфейса месте слушателя. При этом предоставляется возможность прослушать просимулированный сигнал для сопоставления с исходным.

### 3. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЗВУКА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМОЙ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ

В распределенных системах звуковоспроизведения, которые нередко применяются в залах заседаний, каждому слушательскому месту соответствует индивидуальный громкоговоритель. При использовании высококачественных излучателей это должно обеспечивать одинаково высокое качество звукопередачи на всех местах. Поставленная цель

была бы, несомненно, достигнута, если бы звук на каждом месте определялся только лишь излучением одного громкоговорителя. Реальный же сигнал формируется за счет излучения всеми громкоговорителями, входящими в систему, и является результатом наложения многих сигналов. Выясним, к каким последствиям приводит эта интерференция и какая часть громкоговорителей реально влияет на формирование звука на одном месте.

В качестве конкретного примера была рассмотрена система из 465 громкоговорителей, расположенных в 15 рядах (по 31 месту в каждом ряду). Расстояние между рядами равно 1 м, расстояние между громкоговорителями в ряду составляло 0.5 м. Предполагалось, что громкоговорители марки 1ГДШ5 установлены с наклоном  $30^\circ$  к горизонтальной плоскости. Точки приема сигналов совмещались с предполагаемым положением головы слушателя, который смещен вдоль ряда на 0.2 м относительно соответствующего индивидуального громкоговорителя. Для того, чтобы учесть влияние кресел и парт на направленность излучения звука одиночным излучателем, в зале, где уже установлена подобная система, были измерены величины, необходимые для аппроксимации диаграммы направленности громкоговорителя. Результаты расчетов для пустого зала в пренебрежении отражениями приведены ниже. “Звуковое покрытие” (рис. 1) оказалось весьма равномерным, за исключением крайних мест, для которых уровень звука падает (наиболее ощутимо – в угловых точках).

Уровень звука на местах, отмеченных точками, различается не более, чем на 1 дБ. Частотные характеристики, соответствующие этим местам, также очень близки друг к другу. Выберем среднее место в 8 ряду и рассмотрим зависимость уровня звука от количества громкоговорителей, вклады которых учитываются при расчете.

На рис. 2, а показана зависимость интегрального уровня от радиуса круга с центром на избранном месте, в пределах которого находятся излучатели, учитываемые при расчете. Из графика видно, что с увеличением радиуса наблюдается насыщение. При этом радиус круга, которому соответствует отличие уровня на 1 дБ от максимального, составляет 3 м (для угловой точки радиус аналогичного сектора равен 4.5 м). Внутри этого круга размещается 108 излучателей (см. рис. 2, б). Отличию на 2 дБ соответствует круг радиусом 2 м (35 излучателей). Таким образом, в формировании звукового поля на одном месте участвует значительное количество излучателей. При этом уровень суммарного звукового сигнала существен-

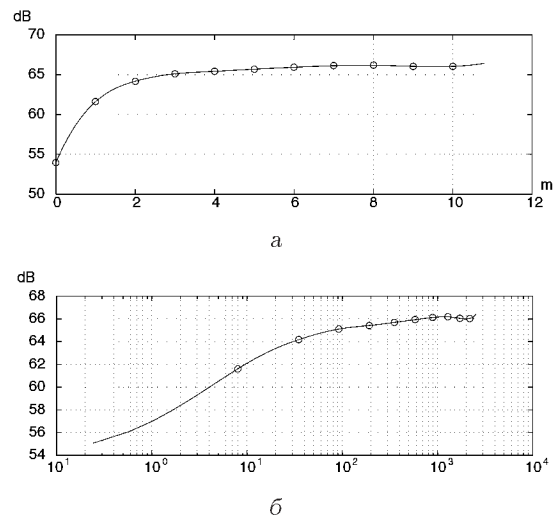


Рис. 2. Зависимость уровня звука от радиуса круга (а) и от количества громкоговорителей (б), находящихся внутри круга, вклад которых учитывается при расчете

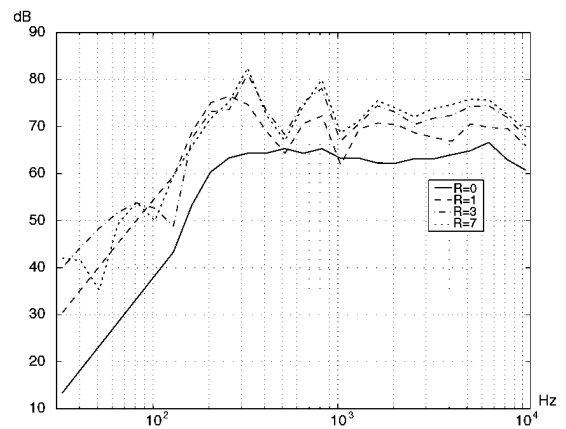


Рис. 3. Частотные характеристики звуковоспроизведения на рабочем месте в зависимости от числа учитываемых при расчете громкоговорителей

но (на 9–11 дБ) превосходит уровень звука, создаваемого одним громкоговорителем.

Интерференция волн от многих громкоговорителей заметно изменяет частотную характеристику звуковоспроизведения по сравнению с той, которая отвечает индивидуальному громкоговорителю. На рис. 3 показано изменение частотной характеристики в зависимости от радиуса упомянутого круга. Нижняя кривая соответствует излучению одного громкоговорителя. Характерными особенностями результирующей частотной характеристики, обусловленными интерференцией

звуковых волн, являются подъем низких частот и наличие пиков и провалов в области низких и средних частот.

Заметим, что расчет по традиционной методике (т. е. без учета интерференции и изменения направленности излучателей с частотой) не выявил бы экспериментально подтверждаемой неравномерности частотной характеристики.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенный пример указывает на эффективность предлагаемой методики исследования характеристик распределенной системы озвучивания. При наличии соответствующего программного обеспечения затраты времени на расчеты по традиционной или усовершенствованной методике отличаются мало. В то же время, совершенство-

ванная методика является более точной и информативной. Она дает проектанту дополнительные возможности при выборе того или иного технического решения. Методика была апробирована при разработке проектов систем озвучивания зала заседаний Окружной Думы в г. Салехарде (Россия), а также конференц-зала Верховной Рады Украины и показала свою эффективность.

1. *Poletti M. A.* The philosophy of electronic room enhancement // Proc. 139-th Meeting Acoustical Society of America.– Atlanta, USA.– 30 May–3 June, 2000.
2. *Сапожков М. А.* Звукофикация открытых пространств.– М.: Радио и связь, 1985.– 304 с.
3. *Шендеров Е. Л.* Излучение и рассеяние звука.– Л.: Судостроение, 1989.– 304 с.
4. *Byrne D., et al.* An international comparison of long-term average speech spectra // J. Acoust. Soc. Amer.– 1994.– **96**, N 4.– P. 2108–2120.