

МЕТОД РАСЧЕТА СИГНАЛА ПАРАЗИТНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Вахитов Я.Ш., Давыдов Д.А.

Санкт-Петербургский Государственный Институт Кино и Телевидения, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: da.davydov@mail.ru

Предлагаемый метод позволяет рассчитывать сигнал паразитной акустической обратной связи и, как следствие, устойчивость системы звукоусиления помещения на стадии проектирования. Это позволяет избежать паллиативных мер применения технических средств по борьбе с уже возникшей паразитной акустической обратной связью. Для расчета используется метод мнимых источников. Он позволяет рассчитать сигналы, приходящие в точку наблюдения. Далее необходимо выбрать сигналы или пачку сигналов с наибольшей амплитудой и сравнить их с прямым сигналом из громкоговорителя. Если рассчитать разность хода прямого и отраженных лучей, можно вычислить частоту, на которой возможно самовозбуждение системы. Рассчитав частоту, установив поверхность, от которой происходит отражение, можно обработать эту поверхность поглощающим материалом с целью устранения данного паразитного сигнала. При практических экспериментах данный метод показал свою корректность и работоспособность.

Ключевые слова: реверберация, модель Эйринга, метод мнимых источников, акустический сигнал, акустическая обратная связь

METHOD OF CALCULATING OF THE SPURIOUS ACOUSTIC FEEDBACK SIGNAL

Vakhitov Y.S., Davydov D.A.

Saint-Petersburg State Institute of Film and Television, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: da.davydov@mail.ru

The proposed method allows to calculate the spurious acoustic feedback signal and as a result the stability of facilities' PA at the design stage. This avoids the palliative application of technical tools to fight already arisen spurious acoustic feedback. It calculates by the method of image sources. It allows calculating the signals coming to the observation point. Next, select signal or pack of highest amplitude signals and compare them with the direct sound from the speaker. If to calculate the path difference of direct and reflected rays, then you can calculate the wavelength. This wavelength allows to calculate the frequency at which the PA system can become unstable. After this could be possible to detect the direction from which it is harmful reflection and the spot of reflection. After calculating the frequency and detecting surface from which the reflection goes this surface that can be treated with an absorbing material in order to eliminate this spurious signal. In practical experiments, this method has shown its validity and reliability.

Keywords: reverberation, Eyring model, imaginary source method, sound signal, acoustic feedback

Система звукоусиления уже давно стала неотъемлемой частью любого публичного выступления, будь то концерт, конференция или даже аудиторная лекция для широкой публики. Естественные акустические свойства помещений не способны усилить речь диктора в достаточной мере, чтобы донести ее до всех слушателей. В случае проведения концерта для большой аудитории, как правило, становится невозможным обойтись прямым звучанием музыкальных инструментов. В связи с этими особенностями неизбежно встает вопрос усиления звукового сигнала от одного или нескольких источников. Осуществляется это усиление, как правило, путем использования микрофонного приема с последующим усилением сигнала с микрофона. Поэтому неизбежно возникает проблема проникновения сигнала, излученного звукоусилительной системой, в подключенный к этой системе микрофон, в который был передан первичный сигнал (см рис. 1). Данное обстоятельство

приводит к возникновению замкнутой цепи, что, в свою очередь, при определенных условиях [3] приводит к возникновению паразитной акустической обратной связи (АОС). Сигнал паразитной АОС является трудноконтролируемым и искажает исходную звуковую информацию.

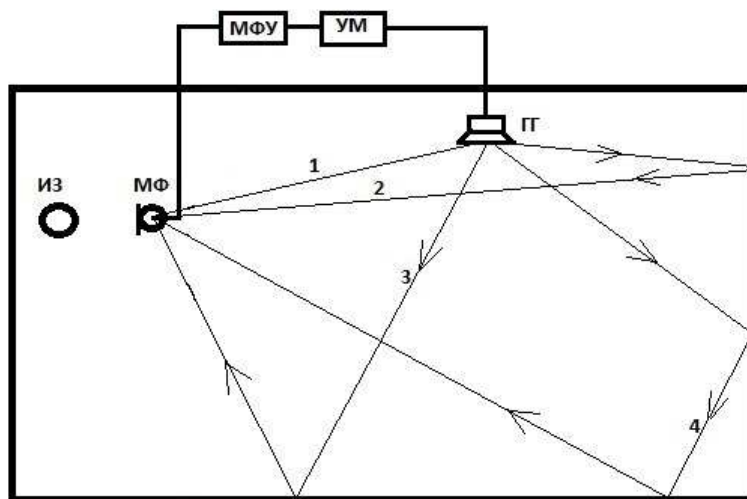


Рис 1. Физическая картина формирования АОС в помещении: звуковые лучи, достигающие микрофона непосредственно от громкоговорителя – 1; после одного отражения – 2,3; после многократного отражения – 4.

МФ – микрофон, ИЗ – источник звука, ГГ – громкоговоритель, МФУ – микрофонный усилитель, УМ – усилитель мощности

Пренебрежение этим обстоятельством приводит к тому, что много усилий и средств тратится на проведение т.н. настройки зала, в процессе которой приходится проверять применение различных технических средств, направленных на создание устойчивой и надежной системы звукофикации [1]. Комплексное же решение строительных вопросов и вопросов озвучения проектируемого помещения позволило бы существенно сэкономить средства. Учитывая отмеченные обстоятельства, тема данной работы, направленная на решение указанных выше задач, является весьма актуальной, в особенности имея в виду наблюдающееся в последнее время увеличение объемов строительства зрелищных и концертных помещений.

Как показывает практика, при исключении возможности попадания прямого сигнала из системы звукоусиления в микрофон, все равно остается возможность возникновения подобного нежелательного эффекта. В таком случае на микрофон начинает действовать диффузная составляющая звукового поля, установившегося в помещении. В работе [4] рассматривается вопрос регенеративной реверберации, которая невозможна без наличия сигнала паразитной АОС и которая существует именно благодаря диффузному полю. Как было показано в [7], продолжительностью и частотной характеристикой регенеративной

реверберации как раз определяется запас устойчивости системы звукоусиления помещения. Это дает возможность рассматривать причины возникновения паразитной АОС с точки зрения теории реверберации.

Метод расчета сигнала паразитной акустической обратной связи

При моделировании расчета сигнала самовозбуждения системы для большей наглядности рассмотрим процесс переотражения звука на двухмерной модели. При необходимости, методику можно экстраполировать на трехмерную модель введением поправки на высоту размещения мнимого источника относительно микрофона. Помещение будет обладать следующими геометрическими размерами: высота $h = 10$ м, ширина $b = 14.5$ м, длина $l = 21$ м.

Исходя из практики, можно считать, что сигналы, на основе которых формируется реальный сигнал обратной связи в озвученном помещении, являются сигналами отражения невысокого порядка [2]. Это положение позволяет представить процесс возникновения реверберационного сигнала в полной динамике его изменения. По мере увеличения времени наблюдения меняется плотностная картина, причем с гораздо большими изменениями, чем в модели Эйринга [9]. Это дает нам возможность более корректно представить сигнал, действующий на приемник. Среди всех отраженных сигналов наибольшей энергией обладают лишь сигналы первых нескольких циклов отражения, как правило, не далее 4-5 отражений. Причем суммарная энергия данных сигналов в точке наблюдения может превышать энергию прямого сигнала из громкоговорителя.

Данное обстоятельство позволяет нам предположить, что для возникновения явления паразитной АОС достаточно учета лишь этой части сигналов во всем временном промежутке наблюдения отражений. Мы учитываем количество отражений, приходящих в один и тот же момент от разных поверхностей и от разных виртуальных помещений. И то, что сигналы приходят одновременно, вовсе не означает, что они приходят от одной и той же поверхности. Для иллюстрации этого приведем на рис. 2 фрагмент плана, использованного для расчета сигнала паразитной АОС.

Физически установить, когда реверберационный сигнал переходит в сигнал паразитной АОС, можно только, исключив систему звукоусиления из помещения. Физически разделить сигналы АОС и реверберации невозможно. Но для нас важен сам факт наличия АОС, пусть и вместе с реверберационным сигналом, поэтому для установления картины отражений можно воспользоваться методом мнимых источников [8].

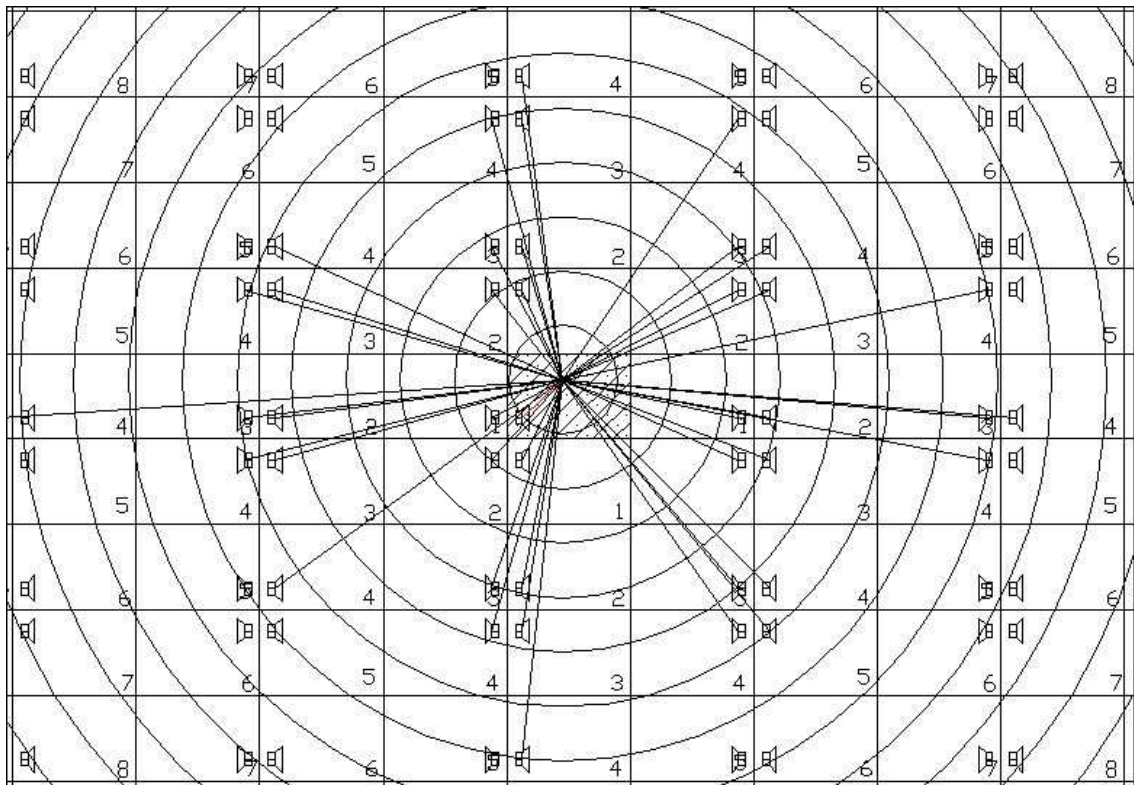


Рис. 2. Метод наблюдения сигналов в точке нахождения приемника

Концентрические окружности с центром в точке наблюдения расположены с шагом, равным средней длине свободного пробега в помещении. Из формулы среднего времени пробега [6]

$$\tau = \frac{4V}{c_0 S}, \quad (1)$$

где V – объем исследуемого помещения, c_0 – скорость звука при нормальных условиях, S – суммарная площадь ограничивающих поверхностей, можно получить среднюю длину пробега l_0 :

$$l_0 = \tau \cdot c_0 = \frac{4V}{c_0 S} c_0 = \frac{4V}{S}. \quad (2)$$

В случае помещения с вышеуказанными параметрами среднее время пробега в помещении $\tau_0 = 26,9$ мс, средняя длина пробега $l_0 = 9,23$ метра. Вычерчивая концентрические окружности с шагом, равным средней длине пробега в помещении, получаем возможность установить, какие отражения будут приходить в точку наблюдения в один и тот же временной интервал, т.к. все точки, находящиеся внутри кольца, ограниченного двумя концентрическими окружностями, будут отстоять от центра на одно и то же расстояние, ограниченное средней длиной пробега. Центром же данных окружностей следует взять точку наблюдения. Как можно видеть, при этом мнимые источники могут находиться не в одном и

том же поясе отражений [8] и, следовательно, потерять различное количество энергии вследствие различного числа отражений от ограничивающих поверхностей.

Мы берем излучаемые системой звукоусиления сигналы как совокупность синусоид разной частоты, т.е. в спектральном представлении. Для воспроизведения данной совокупности в условиях эксперимента следует воспользоваться сигналом, который несет в себе все составляющие, которые способна излучить система. Как правило, наиболее удобным сигналом является отрезок розового шума. Мы можем рассматривать сигнал, содержащий бесконечно большое количество синусоид, но складываться в точке возбуждения каждая из них будет только со своим пакетом волн.

Для сигналов разных частот запаздывания будут разные. Из метода мнимых источников мы можем найти номер отражения и фазу отраженного сигнала. Необходимо учитывать направление прихода сигнала в точку наблюдения и расстояние, которое прошел сигнал. Фаза сигнала формируется временем достижения точки приема, отталкиваясь от точки отражения. Фазовый сдвиг и, следовательно, запаздывание сигнала отражения относительно прямого сигнала рассчитываются через разность хода двух сигналов – прямого и отраженного. Для расчета сигнала в помещении следует рассчитать длины волн сигналов отмеченного ранее порядка, т.е. не более четвертого порядка. С точки зрения наблюдения сигнала самовозбуждения нас интересует разность хода. Эта разность равна длине волны искомого сигнала.

Критерий самовозбуждения Найквиста [3] позволяет найти сигналы отражений, которые, согласно теории обратной связи, могли бы, взаимодействуя с прямым сигналом, привести к появлению сигнала паразитной положительной обратной связи. Используя известное уравнение $c_0 = \lambda f$, мы можем найти частоту f , с которой сигнал будет приходить в точку наблюдения. При этом надо обратить внимание на тот фактор, что наличие и величина отраженного сигнала будут зависеть от того, насколько качественно и с какими характеристиками обработано помещение с точки зрения акустического поглощения.

Интерес представляют сигналы, имеющие в достаточной мере запас энергии звуковой волны, чтобы, сложившись с прямым сигналом, вызвать возбуждение системы звукоусиления. Эти сигналы и вычисляются с помощью модифицированного метода мнимых источников. Одно и то же расстояние дает для разных частот разную фазу. Поэтому в создании сигнала, возбуждающего генерацию, будут участвовать какой-то один или небольшое количество сигналов. Поскольку мы имеем дело с давлением, а давление не является векторной величиной, то складывать мгновенные значения амплитуд звукового давления в точке наблюдения можно арифметически.

Для расчета вероятного направления прихода сигнала паразитной АОС следует идти от противного – искать сигнал, соблюдающий условие Найквиста по балансу фаз, и на основании расположения источника и приемника можно найти, на какой частоте будет наблюдаться генерация.

Для исследования этого момента следует использовать приведенную формулу с учетом того обстоятельства, что возбуждение будет возникать на определенной частоте:

$$P_{\Sigma}(t) = \frac{P_0}{l_0} \sin(\omega_k t) + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_m \beta^m \frac{1}{j \cdot l_0} \sum_{i=1}^n P_i \sin(\omega_k t + \varphi_k), \quad (3)$$

где k – порядковый номер частоты, на которой происходит самовозбуждение, φ_k – сдвиг частоты, обеспечивающий самовозбуждение на частоте ω_k .

Паразитная АОС будет, в любом случае, зависеть от размеров помещения. Для того, чтобы сигнал сложился в фазе со своим отражением, это отражение должно как минимум один раз пройти расстояние, равное длине волны. При частоте 20 Гц получается длина волны 17 метров. Соответственно, разность хода прямого и отраженного лучей должна быть 17 метров. Это очень большая длина для помещения с максимальным размером по одной из осей, предположим, 10 метров. Волна такой длины либо потеряет свою энергию вследствие рассеяния, либо пройдет ограничивающие поверхности в результате неидеальности шумоизоляции помещения для данной области частот. А, как известно [2], реализация шумоизоляции от звуковых волн с низкой частотой и, следовательно, большой длиной волны является достаточно сложной задачей, в отличие от обеспечения шумоизоляции на частотах, соизмеримых с размерами стандартных излучателей звукового диапазона.

Наличие же большой длительности сигнала, превышающей период сигнала, позволяет ориентироваться на сигнал, обладающий линейчатым (дискретным) спектром [5]. Это позволяет все расчетные процедуры проводить с одной составляющей спектра. Следовательно, при нахождении совокупного результата прихода отражений к приемнику мы можем оперировать отдельными составляющими спектра, в которых составляющие запаздывающие могут рассматриваться только с позиции изменения фазы. Иначе говоря, мы можем суммировать мгновенные значения давлений арифметически, но считать сигналы, приходящие в разное время, отличающимися друг от друга только по фазе. По этой причине сигнал паразитной АОС может быть представлен в виде ряда:

$$P_{\Sigma}(t) = p_0(t) + \sum_{m=1}^k \sum_{n=1}^q p_n \sin(\omega_m t + \varphi_m), \quad (4)$$

где q – количество сигналов, участвующих в создании сигнала обратной связи, m – количество частот, склонных к самовозбуждению, φ – фаза, вызывающая самовозбуждение,

она определяется из разности хода сигналов, n – порядковый номер сигнала с данной частотой.

При этом существует вероятность, что, при недостаточной энергии одного отражения, с частотой, точно получаемой вычислением через разность хода, замкнутая система «микрофон-усилитель-громкоговоритель» «перестроится» на близкую частоту, на которой энергии отражений будет достаточно для поддержания самовозбуждения, но с меньшей энергией. Этот процесс вероятен в той мере, что, с точки зрения спектрального анализа по методу Фурье [5], ширина спектра единственной частоты превращается в бесконечно малую лишь при бесконечно длительном времени наблюдения. Так как в реальности это условие не соблюдается, то спектр сигнала до установившегося процесса представляет собой полосу определенной ширины. И если вышеуказанная пачка отражений обладает фазовым сдвигом в пределах ширины полосы спектра, то вероятно самовозбуждение системы на этой частоте.

Для установления суммарной величины звукового давления отраженного сигнала и, соответственно, его возможного влияния на возбуждение системы необходимо складывать значения звукового давления от различных мнимых источников, находящихся в одном и том же временном интервале. Этот интервал, как и в случае нахождения плотности отражений, будет ассоциирован с концентрическими окружностями. Найдя направление возмущающего сигнала и частоту возбуждения, можно найти поверхность, от которой происходит виновное в наличии паразитной АОС отражение. Далее следует проделать акустическую обработку данной поверхности в соответствии с необходимыми условиями для оптимального поглощения сигнала данной частоты.

Для проверки данного метода было проведено натурное моделирование в двух различных с точки зрения акустической обработки помещениях. Одно являлось помещением пресс-центра и не имело акустической обработки, направленной на изменение акустических свойств. Второе помещение – студия звукозаписи, полностью обработанная звукопоглощающими материалами. Были проведены расчеты и эксперименты для обоих помещений. В результате экспериментов было выявлено, что предложенный метод дает увеличение запаса устойчивости для определенного взаиморасположения громкоговорителя и микрофона на уровень не менее 6 дБ, в отдельных случаях наблюдалось полное исчезновение самовозбуждения на одной из рассчитанных частот.

Заключение

Предлагается метод борьбы с акустической обратной связью, позволяющий внести корректировки в акустическую обработку помещения на стадии проектирования данного помещения и системы звукоусиления. В отличие от традиционных подходов, в данной статье рассматривается возможность возбуждения системы от первых отражений сигнала в

помещении. В результате проведения расчетов для реального помещения и последующей акустической обработки по предложенному методу было установлено, что приведенный метод позволяет значительно улучшить устойчивость системы звукоусиления.

Список литературы

1. Анерт В., Райхардт В. Основы техники звукоусиления. — М.: Радио и связь, 1984. — 320 с.
2. Вахитов Ш.Я., Ковалгин Ю.А., Фадеев А.А. Акустика: Учебник для ВУЗов. — М.: Горячая линия-телеком, 2009. — 660 с.
3. Иванов М.Т., Сергиенко А.Б., Ушаков В.Н. Радиотехнические цепи и сигналы. Учебник для вузов. Стандарт третьего поколения. — СПб: Питер, 2014. — 336 с.
4. Индлин Ю.А., Фурдуев В.В. Регенеративная реверберация при звукоусилении в закрытых помещениях. // Акустический журнал. — 1968. — №2. — С. 221-226.
5. Морз Ф. Колебания и звук. — М.-Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949. — 497 с.
6. Сапожков М.А. Электроакустика. Учебник для ВУЗов. — М.: Связь, 1978. — 272 с.
7. Сухаревский Ю.М. К теории акустической обратной связи в звукоусилительных системах. // Доклад АН СССР. — 1940. - №26/5. — С. 437-442.
8. Allen Jont B., Berkley David A. Image Method for Efficiently Simulating Small-room Acoustics. // Journal of The Acoustical Society, Jan. — 1979. — Vol. 65. — P. 943-950.
9. Eyring C. F. Reverberation Time in “Dead” Rooms // Journal of The Acoustical Society, Jan. — 1930. — Vol.1. — P. 217-241.

Рецензенты:

Майзель А.Б., д.т.н., профессор, начальник отдела, ОАО «ЦКБ МТ «Рубин», г. Санкт-Петербург;

Уваров В.К., д.т.н., профессор кафедры математики и физики, ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский Государственный Институт Кино и Телевидения, г. Санкт-Петербург.