

Расположение громкоговорителей в комнате прослушивания и комнатные моды

Журнал «Сtereo-Видео»
№10/октябрь/2010

Звук, слышимый нами в комнате прослушивания или в помещении домашнего кинотеатра, формируется работой звуковоспроизводящего оборудования и акустическими свойствами окружающего нас пространства. Тональный баланс и тембр звука может значительно изменяться в зависимости от места расположения слушателя, громкоговорителей и геометрии комнаты. Более того, собственные акустические резонансы помещения (их ещё называют стоячими волнами или комнатными модами) могут оказывать такое влияние, что даже будут преобладать над звуком исходной фонограммы.

Андрей Смирнов, инженер-физик, руководитель компании «Акустические материалы и технологии»

Стоячие волны создают в помещении серию «пиков» и «провалов», при этом в определенных зонах уровни громкости могут быть как выше, так и ниже воспроизводимых источником. Звуковое давление, создаваемое модами, имеет более высокие уровни возле стен, еще более оно высоко в зонах двугранных угловых (стыки стена/потолок, стена/пол, стена/стена), а самые высокие уровни наблюдаются в зонах трехгранных угловых (стыки стена/стена/потолок или стена/стена/пол).

Стоячие волны — колебания, которые возникают вследствие наложения на прямую волну отраженной волны, распространяющейся в обратном направлении. В отличие от бегущих волн, стоячие волны не переносят энергии, а точки колеблющейся системы (тела, среды) находятся в одинаковой фазе колебания, но с разными амплитудами. Образующиеся пучности и узлы разделены расстоянием, равным $1/2$ длине волны.

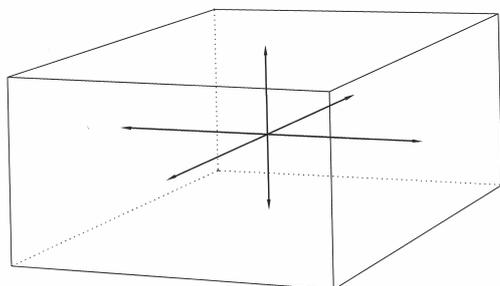
Пропорции комнаты, т.е. соотношения длины, ширины и высоты, задают расположение комнатных мод в частотном спектре, а также плотность их распределения. Размеры, как таковые, определяют частоты, на которых имеют место резонансы, т.е. то, будут ли отдельные, имеющие огромное значение для воспроизводимой музыки, частоты усиливаться или же подавляться. В прямоугольных комнатах с ровными и отражающими поверхностями (стенами, полом и потолком) эти резонансы легко могут быть вычислены по следующей, хорошо известной формуле:

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}$$

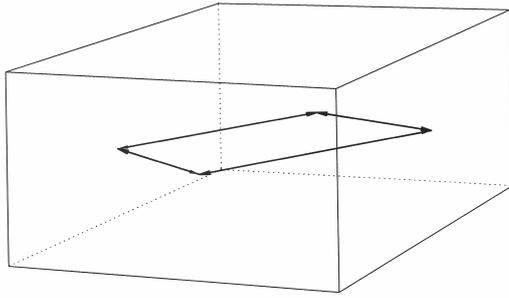
где n_x , n_y и n_z – целые числа, а L_x , L_y и L_z – это соответственно длина, ширина и высота помещения.

Для вычисления всех мод необходимо перебрать все возможные комбинации из трех целых чисел N_x , N_y , N_z . На практике же достаточно вычислить только низкочастотные моды, т.е. ограничиться максимальным значением $N=4$.

Существует три типа резонансных мод – аксиальные, тангенциальные и наклонные (косые).

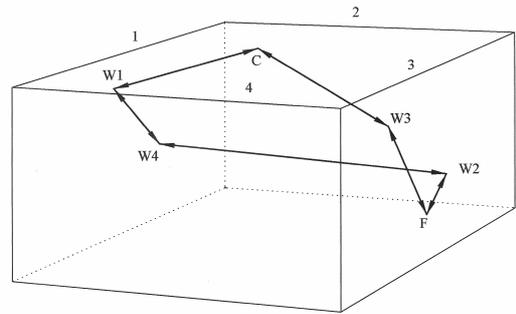


Аксиальные моды возникают между парой противоположных стен вдоль одного из размеров комнаты



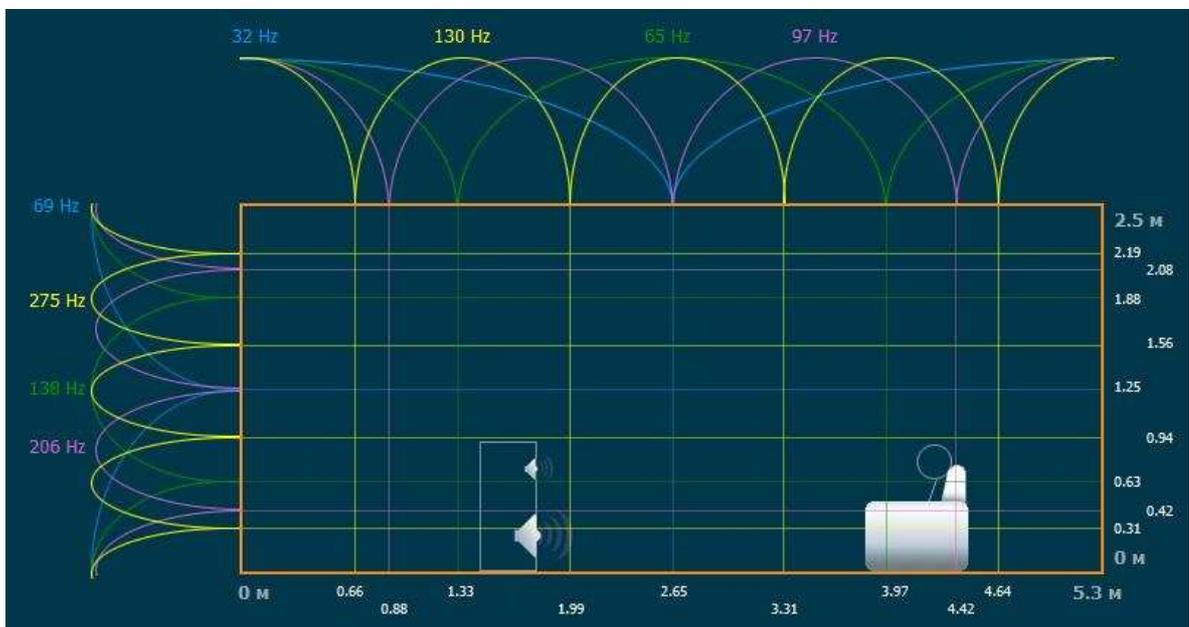
Тангенциальные моды образуются, когда звуковая волна многократно переотражается четырьмя поверхностями, пары которых параллельны друг другу

Наклонные (или косые) моды возникают при участии всех шести внутренних поверхностей комнаты.



Аксиальные моды, как правило, являются самыми интенсивными из всех и при определенном допущении для оценки распределения комнатных резонансов можно пренебречь влиянием тангенциальных и косых мод.

Рассчитать аксиальные комнатные моды можно вручную, а также с помощью несложного акустического on-line калькулятора (<http://acoustic.ua/forms/calculator8.html>).



В помещениях небольшого размера влияние комнатных мод продлевает время затухания звука и увеличивает неравномерность амплитудно-частотной характеристики. Основные проблемы возникают на НЧ из-за сравнительно низкой плотности резонансных мод в диапазоне 40-300 Гц.

Наличие резонансных мод в помещении приводит к нежелательному окрашиванию звука и появлению ярко выраженных дефектов тонального баланса. Фонограмма приобретает характерное «коробчатое» звучание.

Проектировщики студий звукозаписи и музыкальных комнат стараются решить эту проблему путем использования комнат с соответствующими пропорциями, располагая слушателей и громкоговорители в нужных местах, а также применяя специальные низкочастотные поглотители.

Выбор «правильных» комнатных пропорций позволяет значительно снизить влияние комнатных резонансов и ослабить слышимое воздействие мод. За последние десятилетия было предложено большое количество подходов к поиску оптимальных соотношений размеров комнат. В большинстве своем в этих методиках стремятся избежать случаев, в которых повторяющиеся моды располагаются в узком диапазоне частот.

Многие известные акустики занимались данной проблемой. В результате в практике архитектурной акустики устоялось несколько наиболее удачных соотношений комнатных размеров.

Источник	Высота	Ширина/Высота	Длина/Высота
L. W. Sepmeyer, 1965	1,00	1,14	1,39
L. W. Sepmeyer, 1965	1,00	1,28	1,54
L. W. Sepmeyer, 1965	1,00	1,60	2,33
M. M. Louden, 1971	1,00	1,40	1,90
M. M. Louden, 1971	1,00	1,30	1,90
M. M. Louden, 1971	1,00	1,50	2,10
Richard H. Bolt, 1946	1,00	1,50	2,50
Richard H. Bolt, 1946	1,00	1,26	1,59
IEC 60268-13, 1998	1,00	1,96	2,59
Золотое сечение, 1968	1,00	1,62	2,62
Рекомендации Dolby Lab	1,00	1,49	2,31
Худшая пропорция (RPG Inc.)	1,00	1,07	1,87

В 1996 году после серии исследований, проведенных в инженерном департаменте BBC (Research Department Engineering Division of BBC), **Роберт Волкер (Robert Walker)** разработал критерий качества музыкальной комнаты, основанный на вычислении среднеквадратичного расстояния между модальными частотами. Этот метод позволяет получить ряд практических и почти оптимальных размеров комнаты. В 1998 году формула, предложенная Волкером, была принята в качестве стандарта Европейским Радиовещательным Союзом (European Broadcasting Union, TR R22, 1998) и Международным Телекоммуникационным Союзом (International Telecommunication Union ITU-R BS.1116-1, 1998) и рекомендована к применению при строительстве студийных помещений и музыкальных комнат прослушивания.

Соотношение выглядит следующим образом:

$$1.1w/h \leq l/h \leq 4.5w/h - 4,$$

$$l/h < 3, \quad w/h < 3$$

где l – длина,
 w – ширина,
 h – высота помещения.

Кроме того, должны быть исключены целочисленные отношения длины и ширины помещения к его высоте в пределах +/- 5%.

Интерактивный калькулятор для расчета оптимальных размеров комнаты прослушивания доступен по ссылке http://www.acoustic.ua/forms/calculator7_1.html.

Описанная формула позволяет рассчитать не идеальные, но вполне приемлемые соотношения линейных размеров студийных помещений, контрольных комнат и музыкальных комнат прослушивания с точки зрения уменьшения влияния низкочастотных резонансов.

Тем не менее, очень часто приходится иметь дело с комнатой, форму которой изменить уже невозможно. В этом случае важным инструментом для снижения влияния комнатных резонансов является правильное взаимное расположение акустических систем относительно друг друга, ограждающих конструкций и зоны прослушивания.

В практике критического прослушивания существует несколько подходов к расстановке акустических систем в помещении. Один из них был разработан **Джорджем Кардасом (George Cardas)** на основе реализации принципа "золотого сечения". Данная методика применима к любым корпусным акустическим системам, в случае их размещения в любом прямоугольном симметричном помещении с сопоставимыми размерами. В правильности такого подхода можно легко убедиться путем непосредственного прослушивания без использования специальной аппаратуры.

Установка акустических систем в замкнутом помещении приводит не только к возбуждению комнатных мод, но и к возникновению интерференционных искажений, обусловленных взаимодействием прямого звука громкоговорителей с отражениями звуковых волн от ограждающих конструкций (так называемый **SBIR**-эффект (Speaker Boundary Interference Response)). При этом, из сигнала, доходящего до зрителя, исчезает полезная информация в целом наборе информационно-значимых частотных полос, что сильно искажает тональный баланс исходной фонограммы. Частоты, на которых возникает нежелательное акустическое взаимодействие, пропорциональны расстоянию от громкоговорителей до стен помещения и в основном находятся в диапазоне 50-250 Гц. На звучание стереосистемы более всего влияют искажения, обусловленные взаимодействием (в порядке значимости):

- громкоговорителя с ближайшей боковой стеной;
- громкоговорителя с фронтальной стеной;
- громкоговорителя с дальней боковой стеной.

Рассмотрим варианты размещения акустических систем в комнатах различной формы и методы борьбы с нежелательными акустическими дефектами.

Комната прослушивания с продольной ориентацией

Использование принципа "золотого сечения", позволяет расположить громкоговорители в музыкальной комнате таким образом, чтобы рассогласовать частоты, на которых проявляются акустические дефекты, а также исключить или значительно уменьшить унисон вредных резонансов.

Для того, чтобы расположить корпусные акустические системы в прямоугольном симметричном помещении в соответствии с принципом «Золотого сечения» необходимо запомнить две простые формулы (Диаграмма А):

- расстояние от центра низкочастотного громкоговорителя до боковой стены:
Ширина помещения RW , (м) $\times 0,276$
- расстояние от центра низкочастотного громкоговорителя до фронтальной стены:
Ширина помещения RW , (м) $\times 0,447$

Диаграмма А

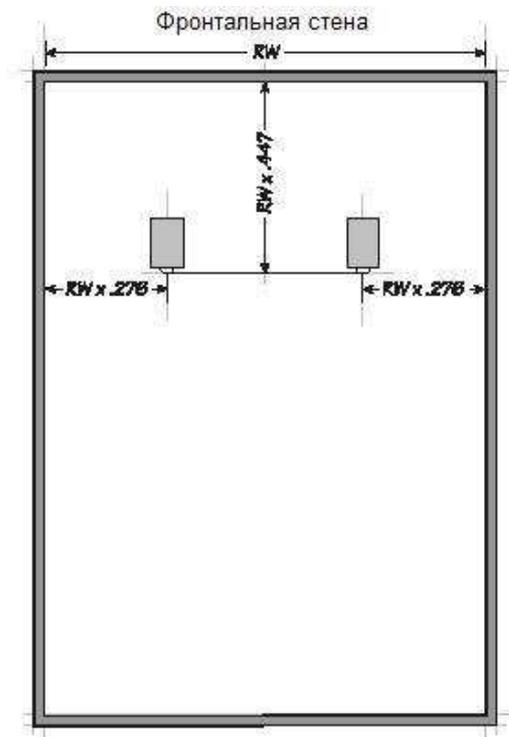
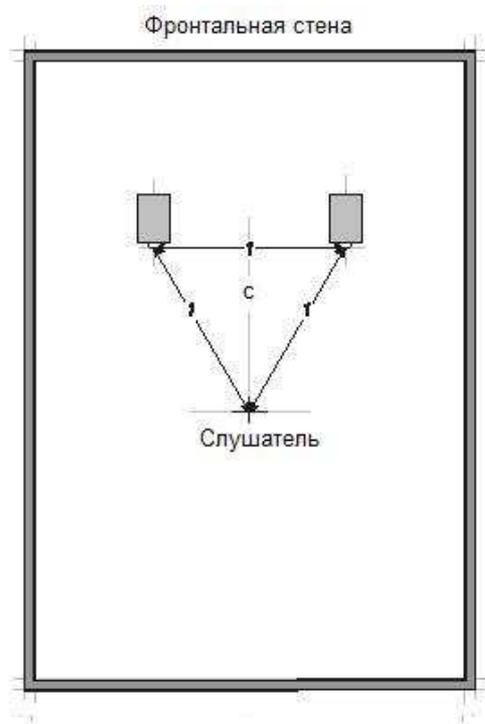


Диаграмма В



После того, как громкоговорители в помещении расставлены по принципу "золотого сечения", необходимо выбрать позицию слушателя в ближнем звуковом поле

(Диаграмма В). Месторасположение слушателя определяется только расстоянием между центрами громкоговорителей и не связано с размерами самого помещения.

В общем случае оба громкоговорителя и голова слушателя должны быть расположены в вершинах равностороннего треугольника. Длина стороны треугольника должна быть равна расстоянию между громкоговорителями. Важность симметричного расположения акустических систем в маленькой комнате нельзя переоценить. Когда громкоговорители расположены согласно принципу "золотого сечения", необходимо их немного развернуть в сторону слушателя. Это можно сделать, полагаясь на слух. Обычно достаточно разворота громкоговорителей в пределах 5-6 градусов. Корпусные громкоговорители обычно требуют немного большего угла разворота, чем панельные.

Расположение слушателя в ближнем поле обеспечивает прекрасную стереопанораму. Этот прием, как правило, используется в студиях звукозаписи. Тем не менее, это не является универсальным рецептом для музыкальных комнат прослушивания. Очень часто удаление точки прослушивания от плоскости размещения акустических систем бывает более предпочтительным для создания реалистичной звуковой сцены. Оптимальное расстояние «с» может иметь значение в пределах 0,88-1,33 относительно расстояния между фронтальными громкоговорителями.

Комната прослушивания в форме "золотого кубоида"

Комната прослушивания в форме "золотого кубоида" (Диаграмма С) имеет размеры:

$h \times 1,62h \times 2,62h$, где

h - это высота помещения.

Соотношения между линейными размерами такой комнаты соответствуют принципу "золотого сечения" (Диаграмма D) или иррациональной последовательности чисел Фибоначчи (Диаграмма E).

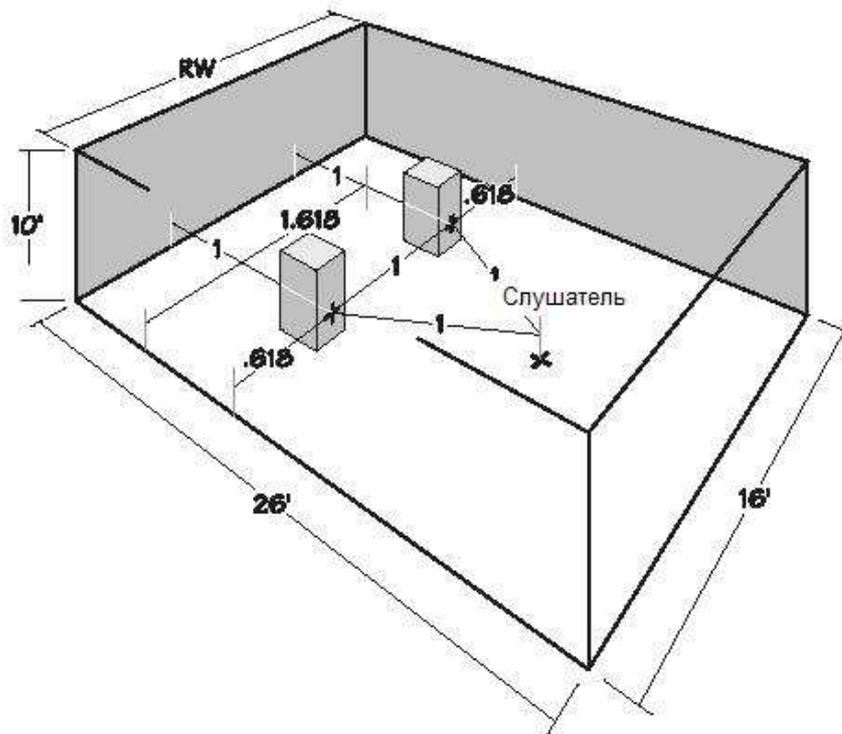
Золотое сечение (золотая пропорция, гармоническое деление) - эту пропорцию принято обозначать греческой буквой ϕ :

$$\phi = (1 + \sqrt{5})/2 = 1,61803398874989484...$$

Числа Фибоначчи - последовательность целых чисел F_n , заданная с помощью рекуррентного соотношения: $F_0 = 0, F_1 = 1, F_{n+1} = F_n + F_{n-1}$. Последовательность чисел Фибоначчи начинается так: 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233...

С точки зрения акустики комната в форме "золотого кубоида" обладает одним замечательным свойством. Так как основные резонансные частоты помещения отличаются друг от друга в соотношении "золотого сечения" (пропорционально размерам комнаты), то взаимодействие стоячих волн (всех типов!!!) не увеличивает, а, наоборот, частично компенсирует неравномерность звукового поля. Это приводит к более естественному звуковосприятию в помещениях малого объёма (менее 100 м³) на низких частотах.

Диаграмма С



Для вычисления месторасположения громкоговорителей в музыкальной комнате, выполненной в форме "золотого кубоида", можно воспользоваться методом отношений (Диаграмма D) или числами Фибоначчи (Диаграмма E). Оба способа вычислений приводят к одинаковому результату.

Диаграмма D

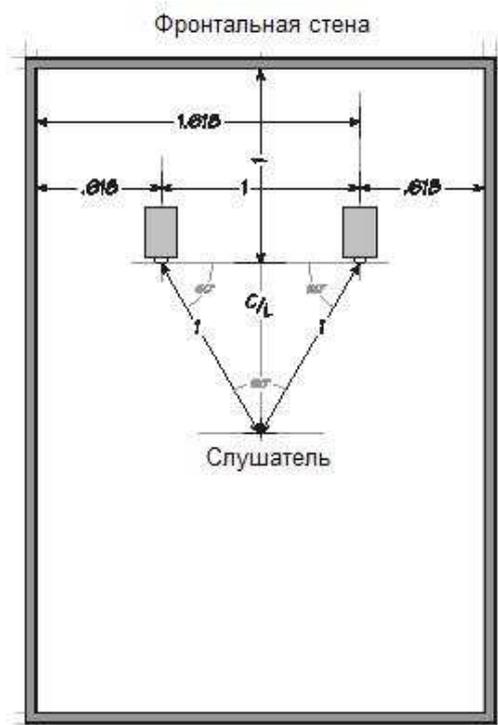
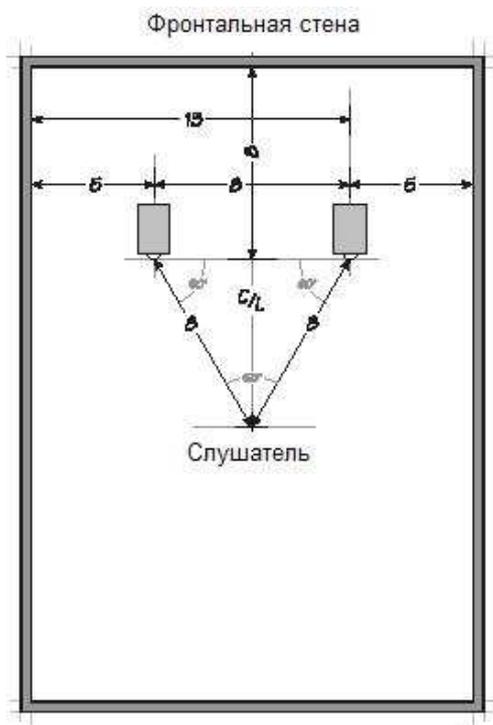


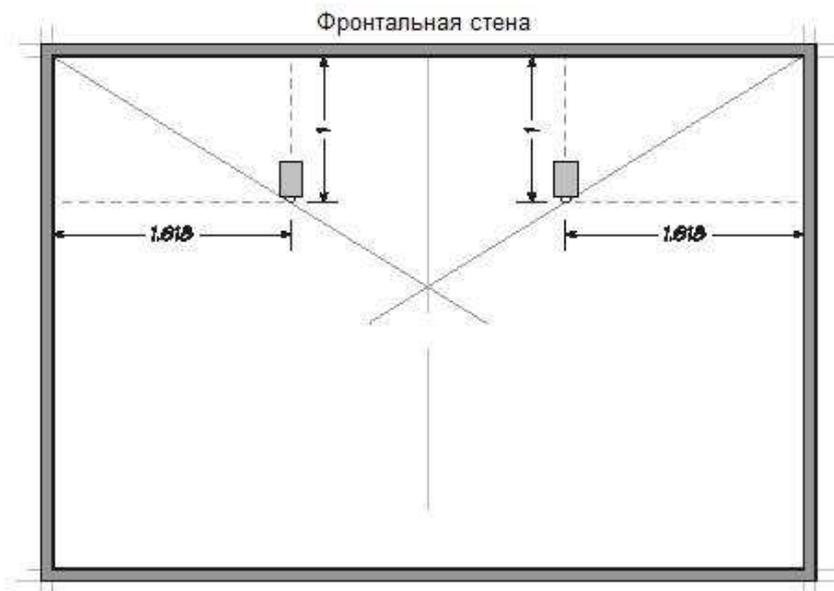
Диаграмма Е



Комната прослушивания с поперечной ориентацией

Если акустические системы в прямоугольной комнате прослушивания расположены вдоль длинной стены, во фронтальных углах помещения необходимо начертить прямоугольники в пропорции "золотого сечения". Громкоговорители рекомендуется размещать в любом месте вдоль диагональной линии, проходящей через внешние фронтальные углы комнаты и диагональные вершины прямоугольников (Диаграмма F).

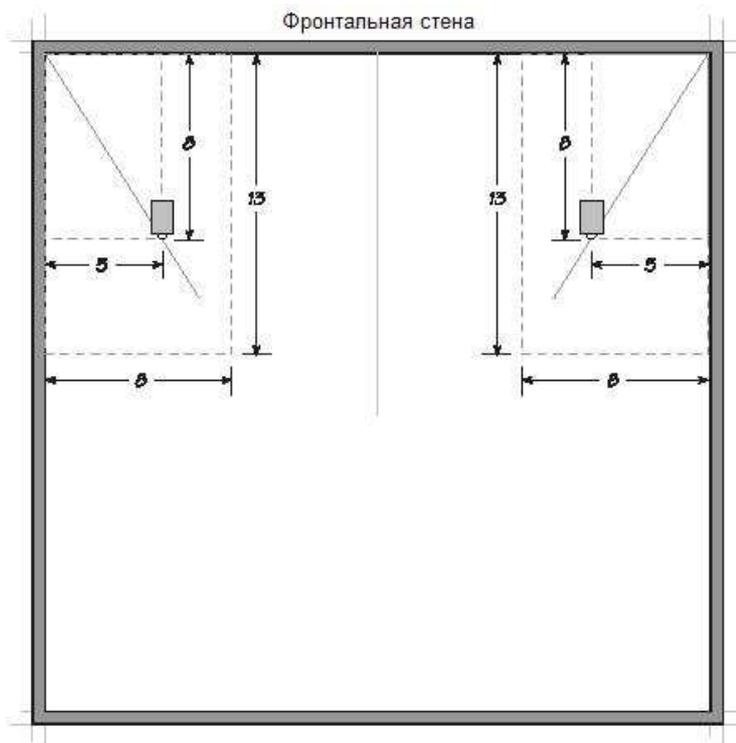
Диаграмма F



Квадратная комната прослушивания

Если Вам не повезло и у вас квадратная комната прослушивания, так же, как и в предыдущем случае, во фронтальных углах комнаты нужно начертить "золотые" прямоугольники и провести через них диагональные линии (Диаграмма G). Громкоговорители необходимо располагать вдоль этих линий.

Диаграмма G



Выполнение этих несложных рекомендаций, основанных на применении гармонического принципа "золотого сечения", позволяет без каких бы то ни было затрат значительно улучшить звучание звуковоспроизводящей аппаратуры в любом симметричном помещении прямоугольной формы. Однако, необходимо отметить, что вышеизложенные рекомендации не являются панацеей от всех акустических несчастий, а касаются только коррекции дефектов, вызванных, прежде всего, влиянием нежелательных комнатных резонансов. Но это та база, основываясь на которой можно выстроить прекрасно звучащую стереосистему, дарящую радость и удовольствие своему владельцу.

Библиография

1. "Setting Up Speakers In A Rectangular Room" by George Cardas
2. "Loudspeakers in Small Rooms" by Floyd E. Toole, PhD, 2005
3. R. H. Bolt, "Note on The Normal Frequency Statistics in Rectangular Rooms," J. Acoust. Soc. Am., vol. 18, pp. 130–133 (1946).
4. R. Walker, "Optimum Dimension Ratios for Small Rooms," presented of the 100th Convention of the Audio Engineering Society, J. Audio Eng. Soc. (Abstracts), vol. 44, p. 639 (1996 July/Aug.), preprint 4191.
5. EBU R22-1998, "Listening Conditions for the Assessment of Sound Programme Material," Tech. Recommendation, European Broadcasting Union (1998).
6. R. Walker, "Low-Frequency Room Responses. Part 1: Background and Qualitative Considerations," BBC Research Dep., Rep. RD1992/8 (1992).
7. F. A. Everest, The Master Handbook of Acoustics, 4th ed. (McGraw-Hill, New York, 2001), pp. 404–405.