АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том I 1955 Вып. 3

ВТОРИЧНОЕ ПОЛЕ ПРИ СТЕРЕОФОНИЧЕСКОЙ ДВУХКАНАЛЬНОЙ ПЕРЕДАЧЕ И НЕКОТОРЫХ ФИКСИРОВАННЫХ ПОЛОЖЕНИЯХ ИСТОЧНИКА ЗВУКА В ПЕРВИЧНОМ ПОЛЕ

И. Г. Тагер

Статья является теоретическим исследованием, посвященным изучению двух главнейших параметров вторичного звукового поля, влияющих на стереофонический эффект: разности уровней энергий, воспринимаемых слушателем от обоих громкоговорителей, и разности времен восприятия сигналов от этих громкоговорителей. Исследовано влияние различных факторов двухканальной электроакустической системы на стереофонический эффект; показано, что у звукооператора всегда есть возможность создать хороший стереофонический эффект во вторичном звуковом поле за счет умелого использования при записи и перезаписи изменения нескольких из числа таких факторов.

При бинауральном восприятии на открытом воздухе слушатель получает в акустическом поле два сигнала от каждого источника звука. Разность времен восприятия этих двух сигналов — соответственно правым и левым ухом — всегда меньше миллисекунды, а разность уровней восприятия, даже если источник звука находится на расстоянии только трех метров от слушателя, уже меньше 1 дб. При электроакустической системе связи по n каналам между первичным и вторичным звуковыми полями слушатель во вторичном звуковом поле (без учета реверберации в обоих помещениях) получает по $2n$ сигналов от каждого источника звука в первичном звуковом поле. Сначала слушатель воспринимает два бинауральных сигнала от одного из громкоговорителей, причем оба эти сигнала сдвинуты друг относительно друга максимум на десятые доли миллисекунды и отличаются друг от друга по уровням максимум на десятые доли децибела. Затем слушатель через некоторое время (практически от нуля до десятков миллисекунд) и притом неодновременно получает остальные $2n-2$ попарно связанных звуковых сигнала; эти сигналы могут отличаться по уровню от первой пары бинауральных сигналов практически от нуля до десятков децибел в зависимости от расстояния источника звука от микрофонов и их расстояния друг от друга, от положения слушателя относительно громкоговорителей и их расстояния друг от друга. Такую систему многоканальной звукопередачи условно принято называть стереофонической. Таким образом, условия восприятия при стереофонической передаче коренным образом отличаются от непосредственного бинаурального восприятия одного или нескольких (движущихся или неподвижных) источников звука в первичном акустическом поле.

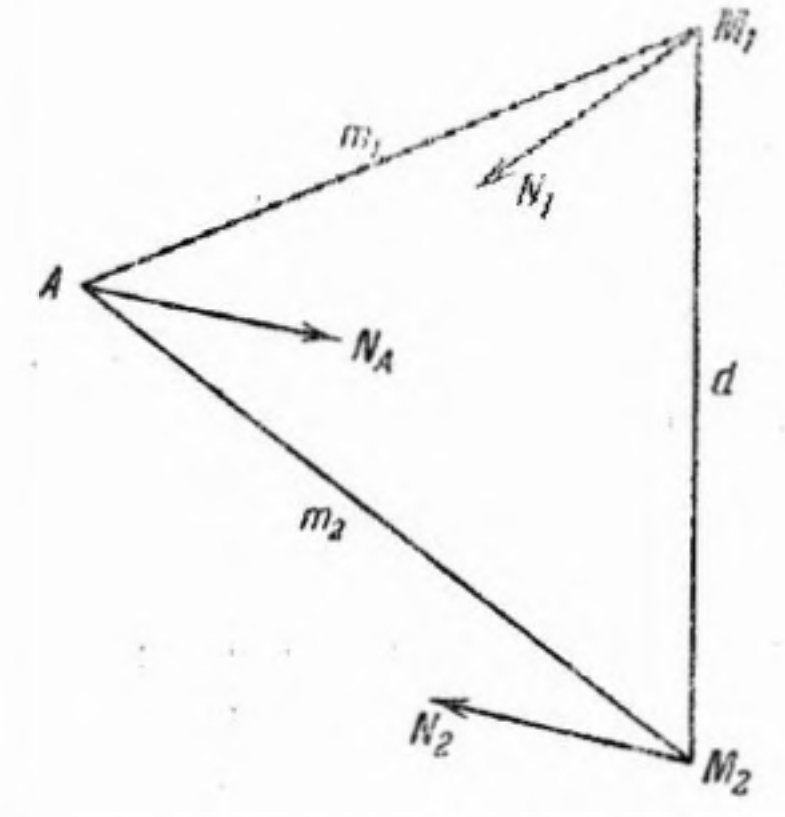
Пусть в первичном звуковом поле (фиг. 1) находится один источник звука A и два микрофона M_1 и M_2. Здесь N_1 и N_2 — направления, для которых чувствительность микрофонов, вследствие направленности, максимальна; будем также считать, что плотность энергии направленного источника звука A наибольшая в направлении N_A. Введем обозначения

$$m = m_2 - m_1; \quad \mu = m_2 / m_1. \tag{1}$$

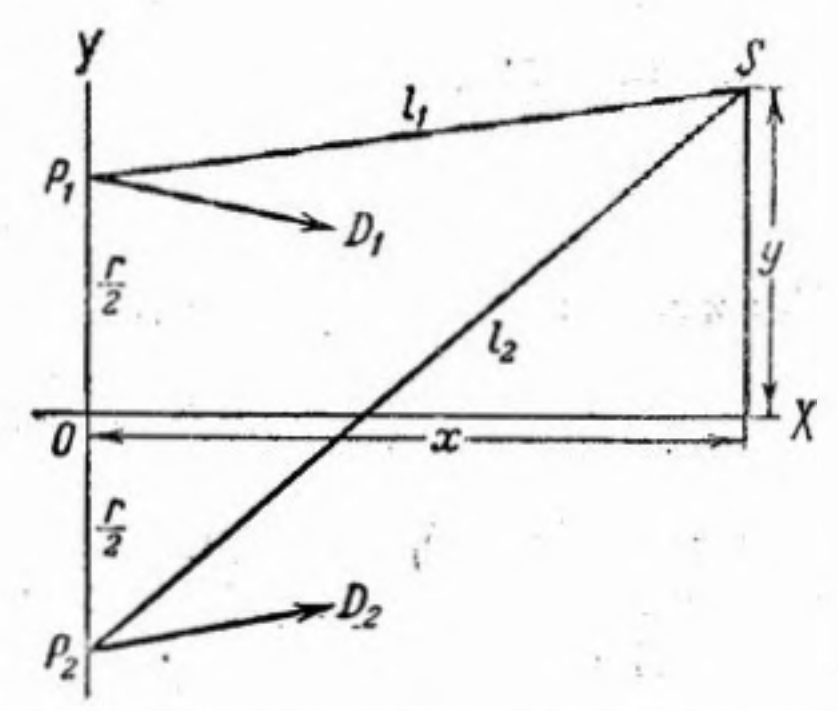
Во вторичном звуковом поле (фиг. 2) расположены громкоговорители P_1 и P_2, причем в направлениях D_1 и D_2 плотности звуковых энергий,

излучаемых ими, имеют наибольшее значение. Каждый из громкоговорителей соединен с соответствующим микрофоном отдельным каналом связи. Исследуем звуковое поле в произвольной точке S с координатами x и y.

Изучим два параметра вторичного звукового поля. Во-первых, исследуем отношение звуковых энергий каждой пары бинауральных сигналов, получаемых слушателем S соответственно от громкоговорителей P_1 и P_2 (пренебрегая расстоянием между ушами слушателя). Во-вторых, исследуем разность времен восприятия слушателем S каждой пары би-



Фиг. 1. Источник звука A и микрофоны M_1 и M_2 в первичном звуковом поле



Фиг. 2. Слушатель S и громкоговорители P_1 и P_2 во вторичном звуковом поле

науральных сигналов, получаемых им соответственно от громкоговорителей P_1 и P_2 при тех же условиях. Начнем с первой задачи.

Обозначим через Δ отношение звуковых энергий, воспринимаемых слушателем S от обоих громкоговорителей P_1 и P_2, т. е.

$$\Delta = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}, \tag{2}$$

где ε_1 и ε_2 — звуковые энергии, воспринимаемые слушателем S от каждого из громкоговорителей P_1 и P_2. Если бы это отношение выразить в децибелах, то очевидно, что разность уровней энергий, воспринимаемых слушателем S соответственно от громкоговорителей P_1 и P_2, будет $\delta = 10 \lg \Delta$.

Опуская промежуточные вычисления, можно соотношение (2) написать в виде

$$\beta^2 \mu^2 \frac{l_2^2}{l_1^2} = \Delta, \tag{3}$$

где

$$\beta^2 = \frac{\varkappa_1 \gamma_1 \varkappa'_P \varkappa'_M k_1^2 K'_A}{\varkappa_2 \gamma_2 \varkappa''_P \varkappa''_M k_2^2 K''_A}. \tag{4}$$

Назовем безразмерную величину $\beta\mu$ фактором двухканальной стереофонической передачи. Все коэффициенты, стоящие в правой части выражения (4), могут быть функциями частоты. Множитель β^2 (или β) может принимать любое, но только положительное значение или равняться нулю. В том случае, когда источник звука A не обладает направленностью ($K'_A = K''_A = 1$), микрофоны M_1 и M_2 также не обладают направленностью ($k_1 = k_2 = 1$) и оба они конструктивно одинаковы ($\varkappa'_M = \varkappa''_M$), если, кроме того, оба канала связи между первичным и вторичным звуковыми полями имеют одинаковые коэффициенты усиления ($\gamma_1 = \gamma_2$),

громкоговорители P_1 и P_2 конструктивно одинаковы ($\varkappa'_P = \varkappa''_P$) и не обладают направленностью ($\varkappa_1 = \varkappa_2 = 1$), то

$$\beta = 1. \tag{5}$$

Преобразуя уравнение (3), находим

$$x^2 + \left(y - \frac{\Delta + \beta^2\mu^2}{\Delta - \beta^2\mu^2} \cdot \frac{r}{2}\right)^2 - \frac{\beta^2\mu^2\Delta}{(\Delta - \beta^2\mu^2)^2} r^2 = 0. \tag{6}$$

Выражение (6) является уравнением геометрического места точек во вторичном звуковом поле, в которых отношение звуковых энергий, воспринимаемых слушателем S, имеет заданную величину Δ. Это уравнение семейства непересекающихся окружностей, центры которых расположены на оси ординат на расстоянии от начала координат, равном

$$y_0 = \frac{\Delta + \beta^2\mu^2}{\Delta - \beta^2\mu^2} \cdot \frac{r}{2}. \tag{7}$$

Радиусы этих окружностей выражаются так:

$$R_0 = \left| \frac{\beta\mu}{\Delta - \beta^2\mu^2} \sqrt{\Delta}\, r \right|. \tag{8}$$

В целях большей общности целесообразно исследование проводить в относительных единицах (относительно расстояния r между громкоговорителями). В этом случае выражения (6), (7) и (8) примут вид:

$$\left(\frac{x}{r}\right)^2 + \left(\frac{y}{r} - \frac{y_0}{r}\right)^2 = \left(\frac{R_0}{r}\right)^2, \tag{9}$$

$$\frac{y_0}{r} = \frac{\Delta + \beta^2\mu^2}{2(\Delta - \beta^2\mu^2)}, \tag{10}$$

$$\frac{R_0}{r} = \left| \frac{\beta\mu\sqrt{\Delta}}{\Delta - \beta^2\mu^2} \right|. \tag{11}$$

Переходим к расчету влияния разности времен восприятия слушателем S звуковых сигналов, получаемых им соответственно от громкоговорителей P_1 и P_2. Из фиг. 1 и 2 ясно, что время запаздывания

$$t = \frac{m + l_2 - l_1}{c}, \tag{12}$$

где $cv = \frac{1}{3}$ метра в миллисекунду — скорость звука.

Делая преобразования, можем уравнение (12) написать в виде

$$x^2 - \frac{r^2 - (ct - m)^2}{(ct - m)^2} y^2 + \frac{r^2 - (ct - m)^2}{4} = 0. \tag{13}$$

Выражение (13) является уравнением геометрического места точек во вторичном звуковом поле, для которых запаздывание сигнала, излучаемого громкоговорителем P_2, по сравнению с сигналом, излучаемым громкоговорителем P_1, имеет заданную величину t, лежащую в пределах от $\frac{m - r}{c}$ до $\frac{m + r}{c}$.

В этом случае выражение (13) является уравнением семейства непересекающихся гипербол. Исследование удобнее выполнить, если уравнение (13) написать так, чтобы входящие в него величины были выражены в относительных единицах, а именно

$$\left(\frac{x}{r}\right)^2 - \frac{1 - \tau^2}{\tau^2}\left(\frac{y}{r}\right)^2 + \frac{1 - \tau^2}{4} = 0, \tag{14}$$

где

$$\tau = \frac{ct - m}{r}. \tag{15}$$

Безразмерную величину τ мы будем называть фактором запаздывания; его возможные числовые значения лежат в пределах от —1 до 1. Заметим, что из (15) и (12) следует $\tau = \frac{l_2 - l_1}{r}$.

Сделаем краткий анализ полученных результатов. В табл. 1 и 2 представлены числовые значения отношений $\frac{y_0}{r}$ и $\frac{R_0}{r}$, вычисленные по формулам (10) и (11). На фиг. 3 и 4 графически интерпретированы некоторые результаты, приведенные в табл. 1 и 2; через P_1 и P_2 попрежнему обозначены громкоговорители.

Так как стереофоническая звукопередача имеет большое значение для кинематографии, то на фиг. 3 и 4 показан и обычный экран Q_1Q_2. Здесь же показан и широкий экран P_1P_2. Если принять для широкого экрана угловые размеры $20° \times 40°$ (с наилучших зрительных мест), то $P_1P_2 = 1{,}74 \cdot Q_1Q_2$. Громкоговорители P_1 и P_2 на фиг. 3 и 4 расположены в точности на вертикальных границах широкого экрана. Через $ac_1e_1e_2c_2$ обозначены границы зрительных мест в кинотеатре. При этом принято $Oe = \frac{Q_1Q_2}{5} = \frac{P_1P_2}{2{,}87}$ и $e_1e_2 = 0{,}6 \cdot Oe$. Границы ac_1 и ac_2 зрительных мест установлены на фиг. 3 и 4 так, что любая часть широкого экрана видна под углом, не превышающим 45° (незначительное число зрительных мест, близких к экрану, около точки a должно быть отброшено).

Таблица 1

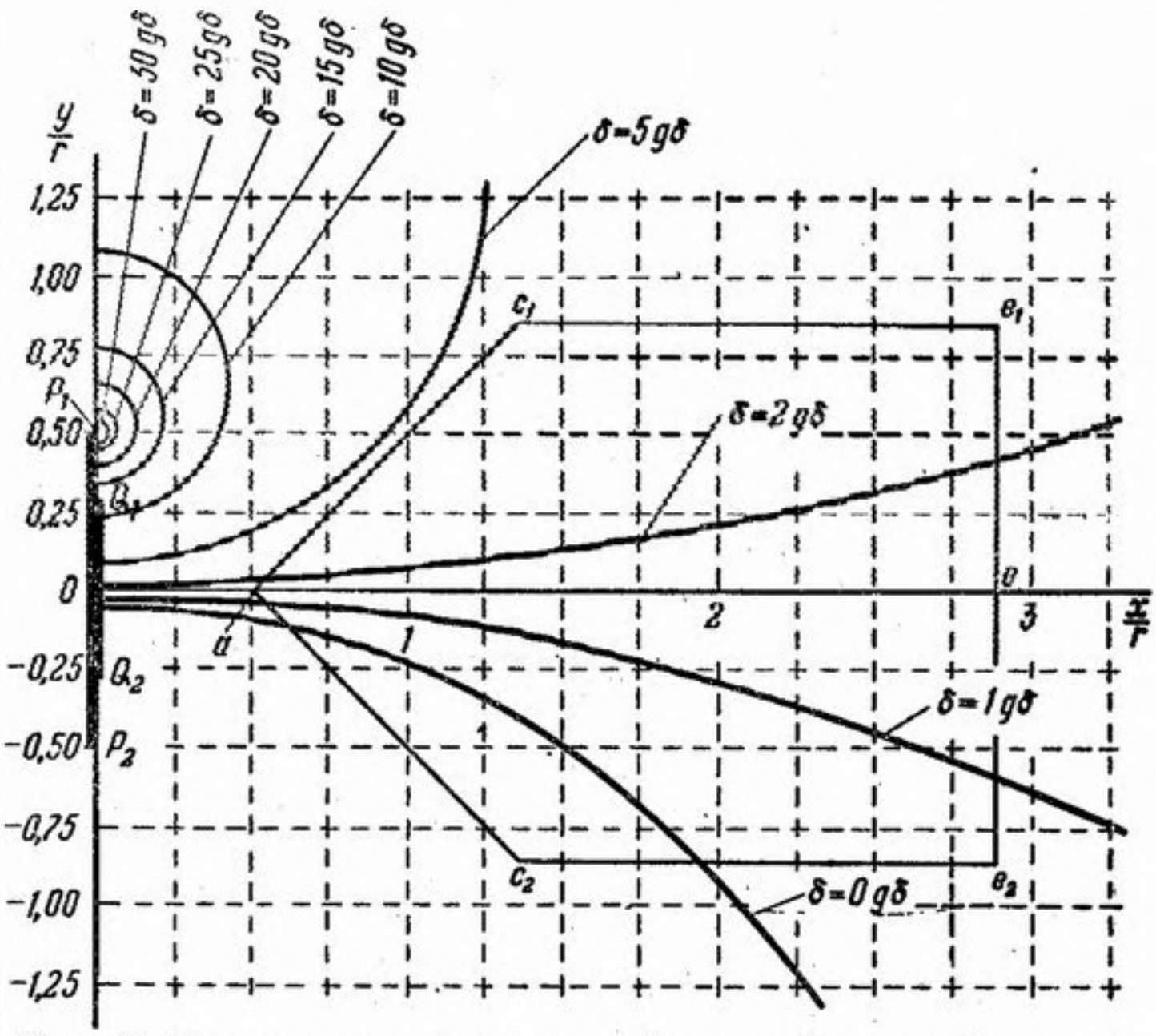
Ординаты (в относительных единицах y_0/r) центров окружностей, являющихся кривыми равных разностей уровней энергий во вторичном звуковом поле

Разность уровней энергий δ дб	Фактор двухканальной стереофонической передачи $\beta\mu$					
	1	1,2	1,5	2	3	5
0	∞	—2,773	—1,300	—0,833	—0,625	—0,542
1	4,362	—7,451	—1,770	—0,959	—0,662	—0,553
2	2,210	10,438	—2,883	—1,156	—0,714	—0,568
5	0,962	1,336	2,966	—4,275	—1,042	—0,645
10	0,611	0,668	0,790	1,167	9,500	—1,167
15	0,533	0,548	0,577	0,645	0,898	4,275
20	0,510	0,515	0,523	0,542	0,599	0,833
25	0,503	0,505	0,507	0,513	0,529	0,586
30	0,501	0,501	0,502	0,504	0,509	0,526

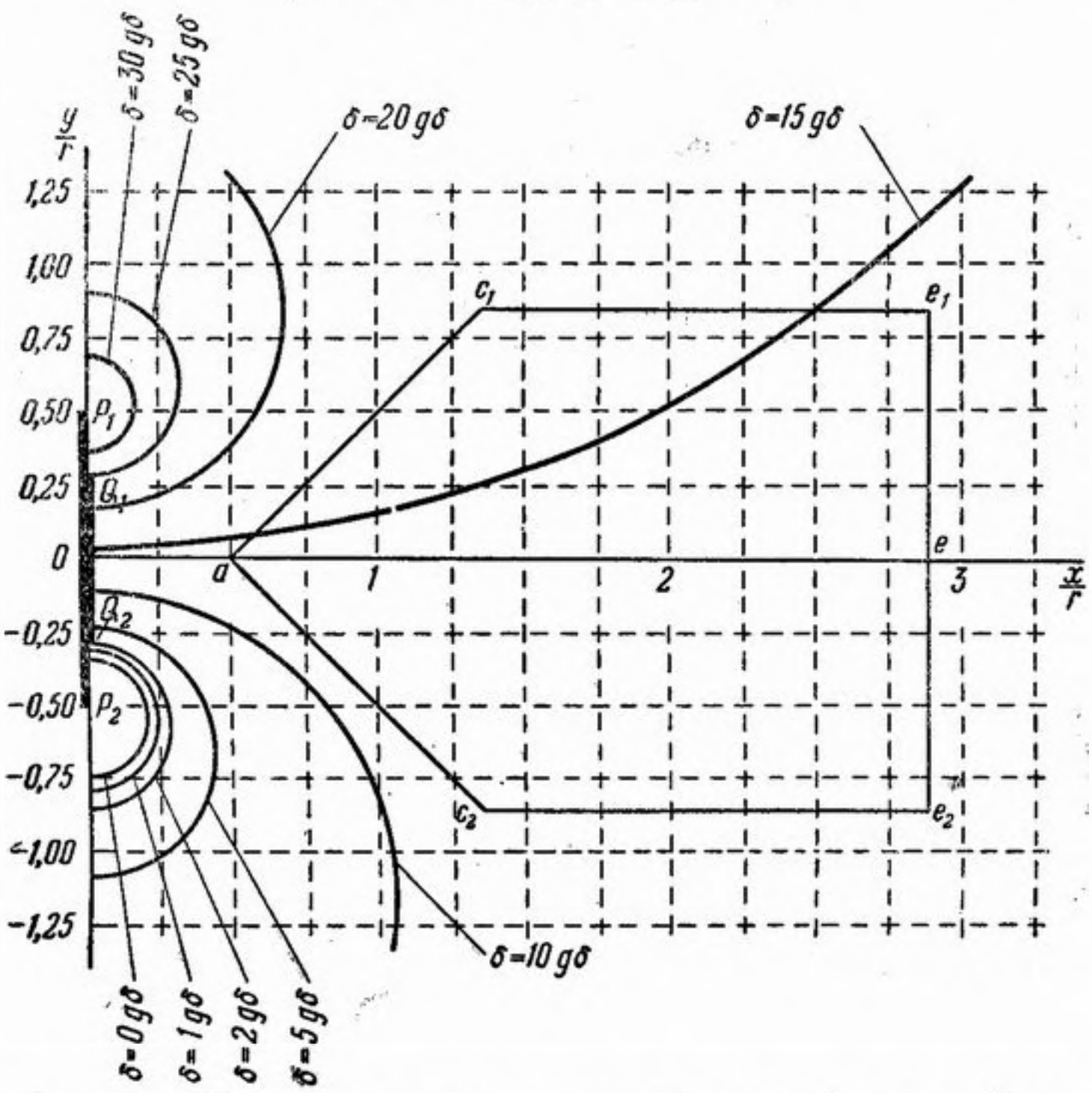
Таблица 2

Радиусы (в относительных единицах R_0/r) окружностей, являющихся кривыми равных разностей уровней энергий во вторичном звуковом поле

Разность уровней энергий δ дб	Фактор двухканальной стереофонической передачи $\beta\mu$					
	1	1,2	1,5	2	3	5
0	∞	2,727	1,200	0,667	0,375	0,208
1	4,334	7,435	1,698	0,819	0,435	0,236
2	2,152	10,426	2,839	1,042	0,509	0,269
5	0,822	1,239	2,924	4,246	0,914	0,407
10	0,351	0,443	0,612	1,054	9,487	1,054
15	0,184	0,224	0, 87	0,407	0,746	4,245
20	0,101	0,122	0,153	0,208	0,330	0,667
25	0,056	0,068	0,085	0,114	0,174	0,305
30	0,032	0,038	0,048	0,064	0,096	0,162



Фиг. 3. Кривые равных разностей уровней энергий во вторичном звуковом поле для фактора двухканальной стереофонической передачи $\beta\mu = 1{,}2$



Фиг. 4. Кривые равных разностей уровней энергий во вторичном звуковом поле для фактора двухканальной стереофонической передачи $\beta\mu = 5$

Кривые на фиг. 3 и 4 приведены для значений $\delta \geqslant 0$; эти же семейства кривых соответствуют значениям фактора двухканальной стереофонической передачи, при которых энергия электрических колебаний, развиваемых микрофоном M_1, равна или больше энергии электрических колебаний, развиваемых микрофоном M_2, т. е. когда $\beta\mu \geqslant 1$.

Предположим сначала для примера, что выполнено условие (5) и что источник звука A на фиг. 1 находится в 5 раз ближе к микрофону M_1, чем к микрофону M_2. В этом случае фактор двухканальной стереофонической передачи $\beta\mu = 5$ и кривые на фиг. 4 дают распределение энергии во вторичном звуковом поле. Прежде всего мы видим, что для всех зрительных мест в кинотеатре звуковая энергия, воспринимаемая от громкоговорителя P_1, значительно превышает звуковую энергию, воспринимаемую от громкоговорителя P_2. Эта разность уровней энергий в зависимости от положения в зоне зрительных мест лежит в пределах приблизительно от 11 до 19 дб. Основываясь на экспериментальных исследованиях Йордана [1], можно приблизительно считать, что при разности уровней энергий в 30 дб кажущийся источник звука во вторичном поле локализуется на громкоговоритель, дающий бо́льшую громкость; при уменьшении разности уровней энергий кажущийся источник звука смещается по приблизительно линейному закону в промежуточное положение между громкоговорителями. Таким образом, все слушатели, находящиеся в зоне зрительных мест, будут локализовать кажущийся источник звука в правой части OP_1 экрана, но в несколько различных местах в зависимости от их положения в кинотеатре.

Если источник звука A на фиг. 1 сместится и займет положение, симметричное относительно микрофонов M_1 и M_2, то фактор двухканальной стереофонической передачи, учитывая (5), будет $\beta\mu = 1$. В этом случае распределение энергий во вторичном звуковом поле будет соответствовать кривым, определяемым вторыми слева столбцами в табл. 1 и 2; разность уровней энергий для слушателей, находящихся точно на оси симметрии ae, равна нулю. Ясно, что эти слушатели будут локализовать кажущийся источник звука в середине O экрана, что и необходимо. Слушатели, находящиеся в зоне ac_1e_1e, в зависимости от своего положения, будут получать звуковую энергию от громкоговорителя P_1 по уровню на 0—3 дб больше, чем от громкоговорителя P_2; эти слушатели будут локализовать кажущийся источник звука хотя и очень близко к середине O экрана, но все же в его правой части OP_1.

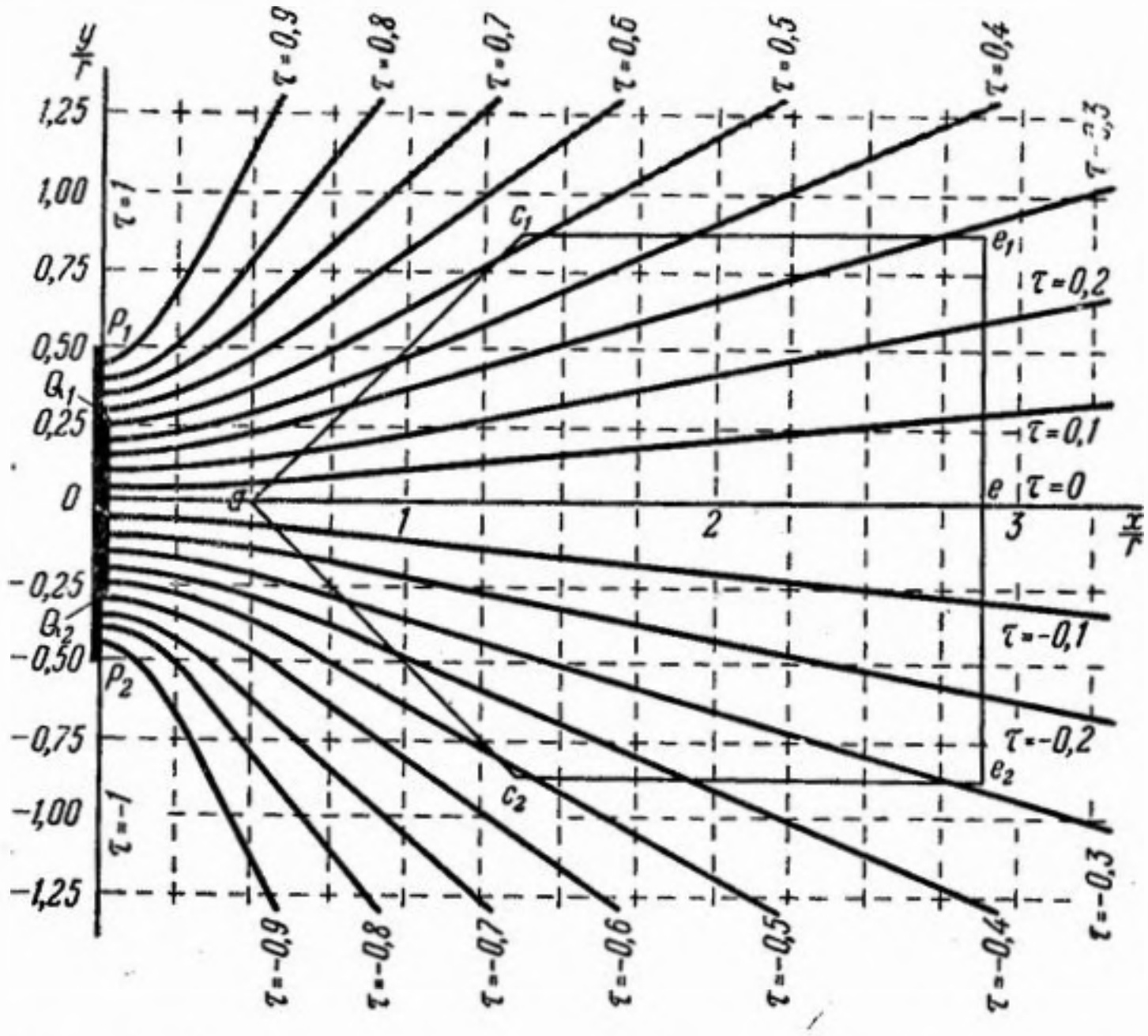
При промежуточных положениях источника звука A в первичном звуковом поле, соответствующих промежуточным значениям $\beta\mu$, будет иметь место распределение энергий, иллюстрируемое табл. 1 и 2 и, в частности, кривыми на фиг. 3 и 4. Из этих данных ясно, что по мере уменьшения числового значения фактора двухканальной стерофонической передачи кажущийся источник звука для слушателей, находящихся в зоне зрительных мест, будет постепенно смещаться влево, что и необходимо.

Из сказанного выше становится совершенно очевидным, что для получения во вторичном звуковом поле стереофонического эффекта при двухканальной передаче при помощи громкоговорителей (исключающих сепарацию) необходимо разносить микрофоны в первичном звуковом поле. В самом деле, предположим, что микрофоны M_1 и M_2 в первичном звуковом поле (фиг. 1) расположены на расстоянии 0,2 м друг от друга. Если источник звука A занимает любое положение, но не меньше 1 м от ближайшего микрофона, то фактор двухканальной стереофонической передачи сможет принимать лишь значения, определяемые неравенством

$$1{,}2 \geqslant \beta\mu \geqslant 0{,}833. \tag{16}$$

В этом случае кривые на фиг. 3 (или их зеркальные отображения в оси абсцисс) соответствуют предельным значениям этого неравенства (16). Мы видим, что разность уровней энергий в зоне зрительных мест не превышает приблизительно 4,5 дб (при расположении источника звука A на расстоянии 1 м от ближайшего микрофона). Потому практически при любом другом положении источника звука в первичном звуковом поле кажущийся источник звука во вторичном поле всегда будет локализован вблизи середины экрана, т. е. стереофонического эффекта не будет.

Обратим теперь внимание на следующее чрезвычайно важное обстоятельство. Фактор двухканальной стереофонической передачи $\beta\mu$ представляет собой произведение двух множителей, из которых один μ, в соответствии с (1), является отношением расстояний от источника звука до микрофонов, а другой β, в соответствии с (4), зависит от направленности источника звука, микрофонов и громкоговорителей и усиления каналов связи. Поскольку в фактор двухканальной стереофонической передачи оба множителя — β и μ входят равноправно, то, давая μ какое-либо фиксированное значение, можно получить во вторичном звуковом поле стереофонический эффект за счет изменения только множителя β.



Фиг. 5. Кривые равных значений фактора запаздывания во вторичном звуковом поле

Так, например, если источник звука A обладает направленностью, то при вращении источника звука в формуле (4) будет изменяться отношение K'_A / K''_A, что вызовет изменение β. Это в свою очередь повлечет за собой изменение локализации кажущегося источника звука во вторичном звуковом поле. Такой же эффект можно получить за счет вращения микрофонов, обладающих направленностью при неподвижном источнике звука, или же за счет изменения коэффициентов усиления каналов связи. Таким образом, у звукооператора всегда есть возможность получить хороший стереофонический эффект во вторичном звуковом поле за счет умелого использования при записи и перезаписи — в соответствии с приведенными здесь соображениями — одновременного изменения расстояний от источника звука до микрофонов и одного или нескольких коэффициентов, входящих в множитель β в соответствии с формулой (4). Разумеется, каждая сцена в первичном звуковом поле требует проведения соответствующего предварительного расчета.

В табл. 3 представлены числовые значения коэффициентов $\frac{1-\tau^2}{\tau^2}$ и $\frac{1-\tau^2}{4}$ в уравнениях (14) гипербол. Из фиг. 5 видно, что фактор запаздывания для всей зоны зрительных мест лежит в пределах от —0,5 до 0,5.

Де-Бур на основании своих экспериментальных исследований нашел, что на локализацию кажущегося источника звука во вторичном звуковом

поле пятикратное время запаздывания t (в миллисекундах) влияет так же, как разность уровней энергий δ (в децибелах); при этом оба фактора влияют на локализацию аддитивно [2]. Если, например, принять $m_1 = 2$ м, $m_2 = 10$ м, $r = 10$ м и учесть (15), то время запаздывания для всей зоны зрительных мест будет лежать в пределах от 9 до 39 миллисекунд. Время запаздывания будет способствовать усилению стереофонического эффекта во вторичном звуковом поле, но на создание стереофонического эффекта оно оказывает значительно меньшее влияние, чем разность уровней энергий. Таким образом, для улучшения эффекта стереофонической передачи одного движущегося источника звука необходимо стремиться к получению бо́льших отношений факторов двухканальной стереофонической передачи, вычисленных для крайних положений источника звука. Аналогично для улучшения эффекта стереофонической передачи нескольких неподвижных источников звука также надо стремиться к получению бо́льших отношений факторов двухканальной стереофонической передачи, вычисленных для двух наиболее удаленных друг от друга источников звука.

Таблица 3

Коэффициенты $\frac{1-\tau^2}{\tau^2}$ и $\frac{1-\tau^2}{4}$ в уравнениях (14) гипербол, являющихся кривыми равных значений фактора запаздывания τ во вторичном звуковом поле

Фактор запаздывания τ	Коэффициенты	
	$\frac{1-\tau^2}{\tau^2}$	$\frac{1-\tau^2}{4}$
0	∞	0,250
±0,1	99,000	0,248
±0,2	24,000	0,240
±0,3	10,111	0,228
±0,4	5,250	0,210
±0,5	3,000	0,188
±0,6	1,778	0,160
±0,7	1,041	0,128
±0,8	0,562	0,090
±0,9	0,235	0,048
±1,0	0,000	0,000

Графики на фиг. 3 и 4 представлены в относительных единицах. Это означает, что с точки зрения разности уровней энергий, воспринимаемых слушателем от обоих громкоговорителей, имеющей наибольшее влияние на стереофонический эффект, последний будет одинаковым во всех геометрически подобных друг другу залах, как в самых маленьких, так и в самых больших.

Кривые на фиг. 3—5 проходят приблизительно вдоль зоны зрительных мест; потому наиболее близкие и наиболее удаленные от экрана слушатели будут локализовать перемещение кажущегося источника звука приблизительно между одними и теми же местами экрана; однако угловое перемещение кажущегося источника звука будет бо́льшим для слушателей, находящихся ближе к экрану, чем для более удаленных. По этой причине в наиболее удаленной от экрана части зоны зрительных мест стереофонический эффект будет хуже, чем в части зоны, более близкой к экрану.

Хотя изложенный метод исследования вторичного звукового поля должен быть в дальнейшем распространен применительно к любому положению одного или нескольких источников звука в первичном звуковом поле и применительно к многоканальной системе связи первичного и вторичного звуковых полей, тем не менее проведенное исследование позволяет установить основные закономерности стереофонической передачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. V. L. Jordan. A system for stereophonic reproduction. Acustica, 1954, 4, 1, 36—38.
2. R. Vermeulen. Stereophonic Reproduction. Audio, April 1954, 38, 4, 21 and 57.

Всесоюзный научно-исследовательский кино-фото-институт
Москва

Поступила в редакцию
19 марта 1955 г.