

## О ЛОКАЛИЗАЦИИ КАЖУЩЕГОСЯ ИСТОЧНИКА ЗВУКА ПРИ ДВУХКАНАЛЬНОЙ СТЕРЕОФОНИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧЕ

*В. С. Маньковский*

На основании опытных данных определяются основные закономерности, характеризующие восприятие движения кажущегося источника звука при двухканальной стереофонической передаче.

Определение оптимального числа каналов и условий, при которых искажения в передаче движения были бы минимальными, так же как и решение ряда других задач, невозможно без знания закономерностей стереофонического восприятия [1, 2, 3]. Выяснение последних связано с определением зависимости между разностью уровней энергий в каналах и положением кажущегося источника звука при различных положениях слушателя относительно звуковоспроизводящей системы. В данной работе мы ограничились опытами с двухканальной системой передачи.

Эксперименты проводились при помощи установки, схема которой показана на фиг. 1. Генератор  $G$  создавал синусоидальные колебания, которые прерывались механическим прерывателем  $\Pi$  с частотой 2—3 раза в секунду. Громкоговорители  $Gr$  выбирались так, что их чувствительность и характеристики направленности были строго одинаковыми. Расстояние между ними —  $2l$  — было выбрано равным 6 м. Регулировка уровней осуществлялась при помощи регуляторов  $P_1$  и  $P_2$ , измерение — при помощи вольтметра  $B$ . Для большей общности результатов все расстояния, характеризующие как положение кажущегося источника, так и положение слушателя, определялись относительно половины расстояния между громкоговорителями и выражались в первом случае через  $x'/l$  и  $y'/l$ , а во втором — через  $x''/l$  и  $y''/l$ .

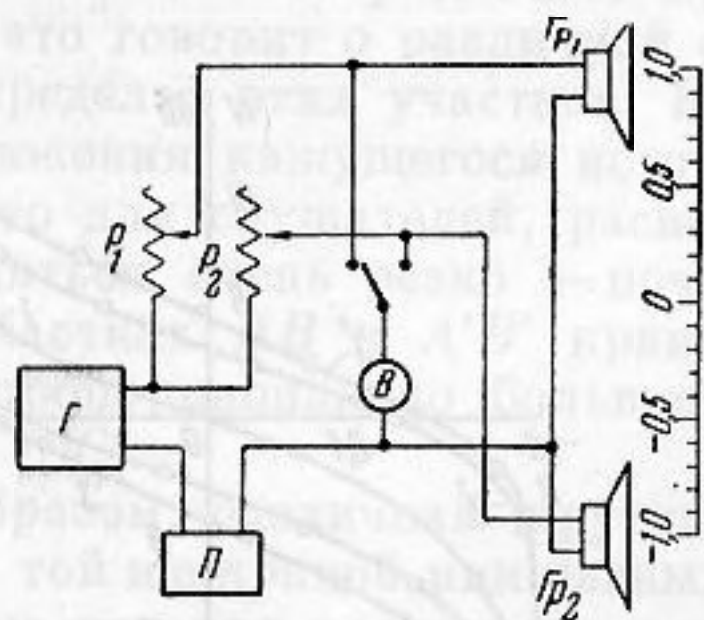
Во время опытов слушатели размещались в точках, обозначенных на фиг. 2 цифрами от 1 до 12, и по шкале, расположенной между громкоговорителями двухканальной системы, определяли положение кажущегося источника при каждом изменении разности уровней силы звука громкоговорителей. После проведения одного опыта слушатели менялись местами и наблюдения повторялись до тех пор, пока каждый из слушателей не выполнял измерений, находясь на каждом из выбранных мест. Разность уровней изменялась ступенями через 2—4 дб в пределах  $\pm 24$  дб. На фиг. 2 показаны также характеристики направленности громкоговорителей ( $I$  и  $II$ ) при частоте 1000 гц.

Опыты проводились в заглушенной комнате и в помещениях с удовлетворительными и неудовлетворительными акустическими условиями.

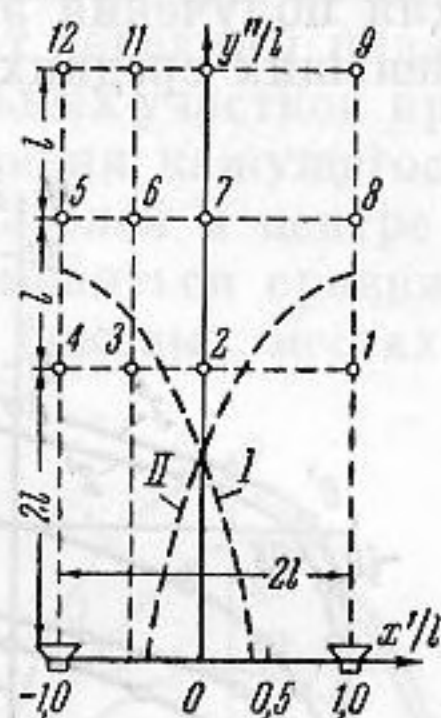
Первое помещение при объеме  $1600 \text{ м}^3$  имело время реверберации, равное 0,7 сек, второе помещение при объеме  $1500 \text{ м}^3$  — 2,8 сек. В значительном большинстве случаев положение кажущегося источника звука определялось как среднее из 66 и даже 84 наблюдений, сделанных из одной и той же точки зрительного зала, что значительно повышало точность измерений.

Один из опытов, проведенных в заглушенной комнате, был выполнен при частотах 200, 1000 и 6000 гц и положении слушателя, определяемом

значениями  $x''/l = 0$ ;  $y''/l = 2$ . Результаты этого опыта представлены соответственно кривыми 1, 2, 3 на фиг. 3; кривая 4 получена в результате пересчета данных Иордана [4]. Как видно из этой фигуры, значительное различие в частоте мало сказывается на зависимости положения кажущегося источника ( $x'/l$ ) от разности уровней ( $N$ ). Это обстоятельство позволило проводить все последующие опыты только при частоте 1000 гц. Следует отметить, что на этой частоте обнаруживается заметное различие в чувствительности



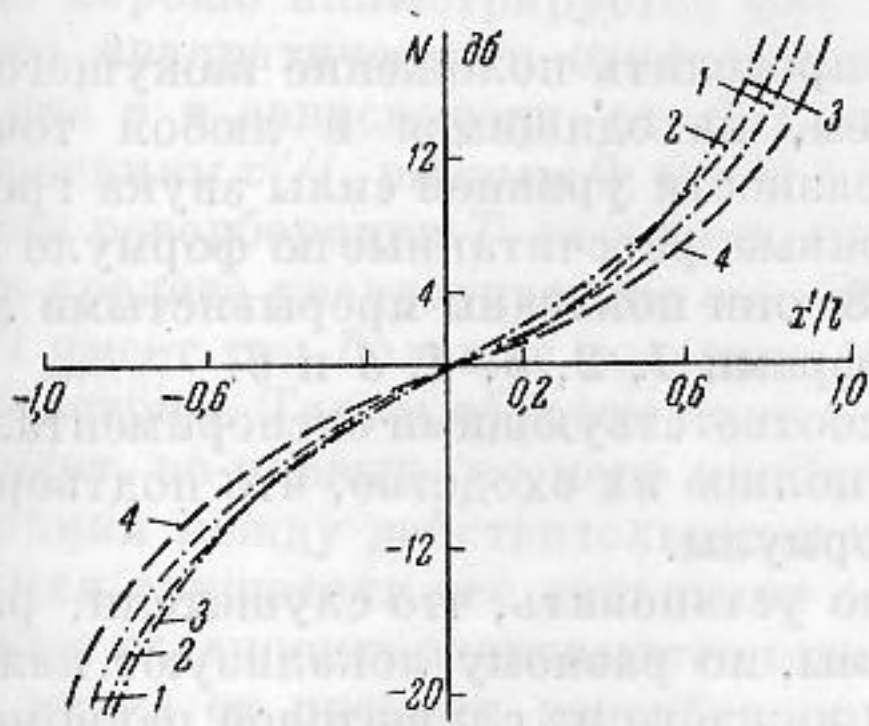
Фиг. 1



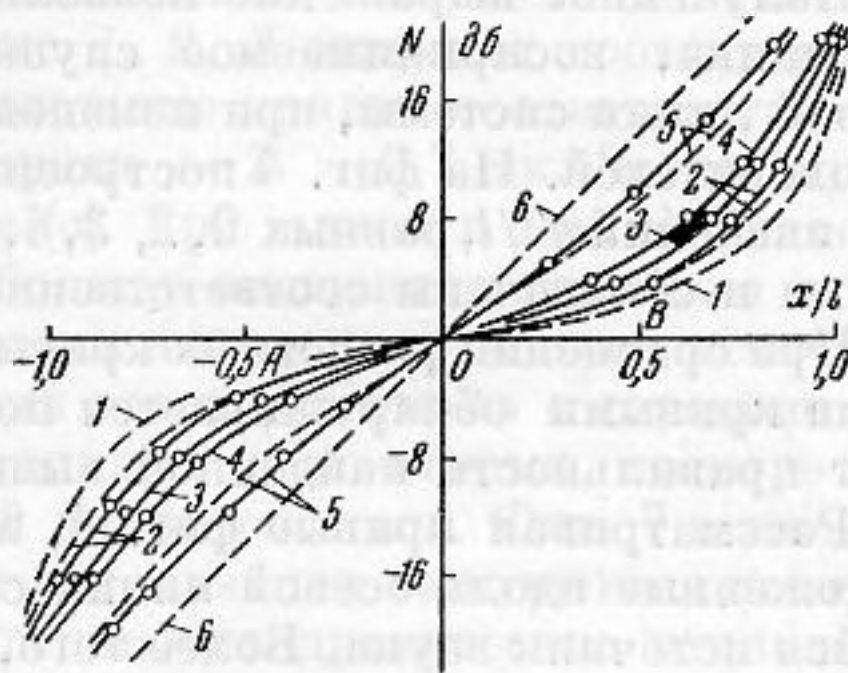
Фиг. 2

громкоговорителей, обусловленное направленностью их действия. В наших опытах это различие для крайних точек зоны, занятой наблюдателями, как это можно определить из фиг. 2, составляло 2—6 дб.

Рассмотрим теперь, как воспринимается стереофонический эффект слушателями, размещенными вдоль оси симметрии двухканальной звуковоспроизводящей системы ( $x''/l = 0$ ). На фиг. 4 сплошными линиями показаны экспериментальные кривые 2—5, характеризующие зависимость



Фиг. 3



Фиг. 4

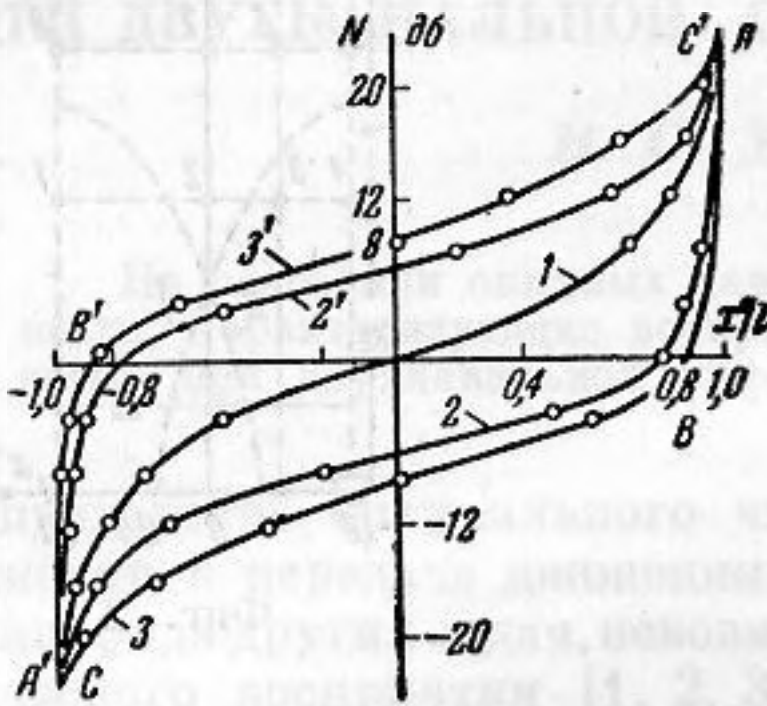
положения кажущегося источника звука от разности уровней силы звука громкоговорителей. Кривая 2 была получена при относительном расстоянии между слушателем и линией громкоговорителей  $y''/l = 2$ , остальные при расстояниях  $y''/l = 3, 4, 6$ , соответственно. При рассмотрении экспериментальных кривых фиг. 4 обнаруживается определенная, хотя и не резко выраженная закономерность. Эта закономерность проявляется в том, что при увеличении расстояния между слушателем и воспроизводящей системой, кривые несколько выпрямляются и поворачиваются в направлении, противоположном движению часовой стрелки. Чтобы убедиться в том, что этот результат не является следствием неточности измерений, для кривых этой фигуры были определены средние квадратические отклонения выборки и критерий  $t$ , сличение которого с данными таблицы

вероятностей по распределению Стюдента показало, что вероятность случайных значений равна нулю. Таким образом, подтвердилась правильность отмеченной выше закономерности.

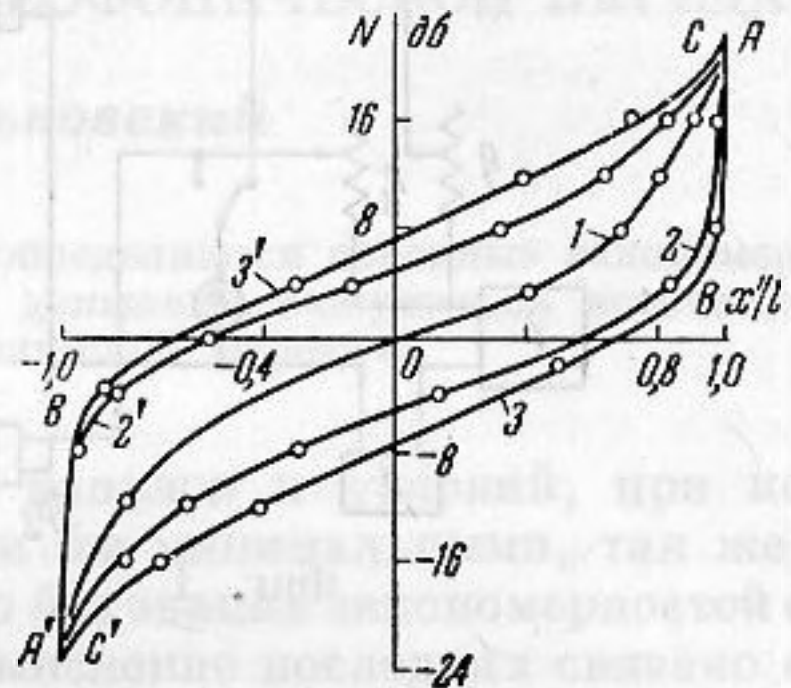
Любая из кривых фиг. 4 может быть представлена равенством

$$N = 2a \operatorname{sh}(bx'/l). \quad (1)$$

Для получения эмпирической формулы для каждой кривой методом наименьших средних ошибок были определены коэффициенты  $a$  и  $b$ . За-



Фиг. 5



Фиг. 6

тем тем же методом была найдена зависимость этих коэффициентов от расстояния между слушателем и линией громкоговорителей ( $y''/l$ ). Подставляя так найденные коэффициенты в равенство (1) и решая его относительно  $x'/l$ , находим, что

$$x'/l = \frac{\operatorname{Ar sh}(1,85 N e^{-0,45 y''/l})}{4,05 - 0,35 y''/l}. \quad (2)$$

Полученное выражение позволяет определить положение кажущегося источника, воспринимаемое слушателем, находящимся в любой точке осевой линии системы, при изменении разности уровней силы звука громкоговорителей. На фиг. 4 построены кривые, рассчитанные по формуле (2) для значений  $y''/l$ , равных 0, 2, 3, 4, 6 и 8; они показаны прерывистыми линиями и обозначены соответственно цифрами 1, 2, 3, 4, 5 и 6.

При сравнении расчетных кривых с соответствующими экспериментальными кривыми обнаруживается почти полное их сходство, что подтверждает правильность найденной выше формулы.

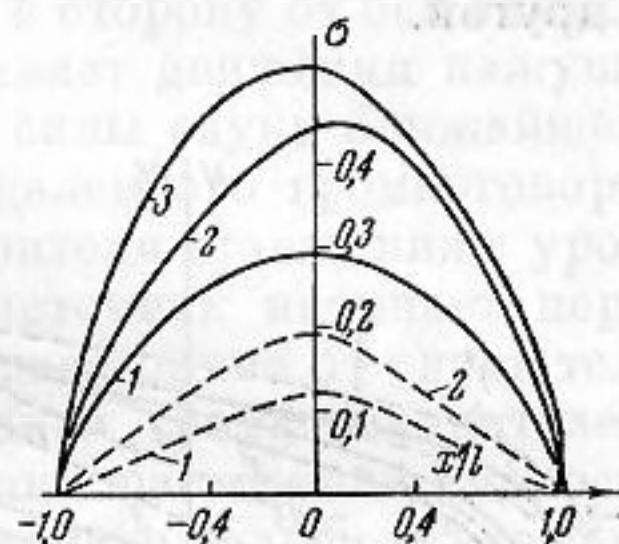
Рассматривая кривые фиг. 4, можно установить, что слушатели, расположенные вдоль осевой линии системы, по разному локализуют кажущийся источник звука. Более того, для каждого из слушателей равномерное изменение разности уровней будет связано с различной скоростью движения кажущегося источника. По мере удаления слушателя от линии громкоговорителей скорость движения кажущегося источника, становясь все более равномерной, в среднем уменьшается, что приводит к сокращению фронта движения кажущегося источника.

Для выяснения того, как влияет смещение слушателя в сторону от оси симметрии системы, рассмотрим семейство экспериментальных кривых зависимости положения кажущегося источника от разности уровней для слушателей, размещенных в одном ряду на расстоянии от линий громкоговорителей  $y''/l = 2$ . Средняя кривая 1 этого семейства, приведенного на фиг. 5, показывает, как воспринимается перемещение кажущегося источника звука слушателем, расположенным на оси симметрии системы. Выше и ниже идут кривые 2' и 2, отвечающие значениям  $x'/l = \pm 0,5$  и, наконец, наиболее удаленные от центра кривые 3' и 3 соответствуют зна-

чениям  $x''/l = \pm 1,0$ . Такое же семейство кривых приведено на фиг. 6 для случая,  $y''/l = 4,0$ .

Фиг. 5 и 6 показывают, что при одинаковых  $N$  слушатели, сидящие в одном ряду, локализуют кажущийся источник звука в различных точках. Если слушатель, расположенный у оси, локализует источник в центре, то слушатели, сидящие справа, будут воспринимать его смещенным вправо тем больше, чем дальше они расположены от середины ряда. Обращает на себя внимание различная крутизна отдельных участков кривых фиг. 5 и 6, что говорит о различной скорости движения кажущегося источника в пределах этих участков. Если для слушателей в центре ряда скорость движения кажущегося источника будет изменяться сравнительно плавно, то для слушателей, расположенных на боковых местах, она будет изменяться очень резко — почти от нулевой на участках  $AB$  и  $A'B'$  кривых 2 и 2', 3 и 3' до непропорционально большой на участках  $BC$  и  $B'C'$ .

Таким образом, различная крутизна участков одной и той же кривой или разных кривых говорит о том, что при равномерном изменении разности уровней нельзя обеспечить строго одинаковую скорость движения кажущегося источника ни в восприятии одного слушателя, ни, тем более, одновременно в восприятии нескольких слушателей, сидящих в одном ряду.



Фиг. 7

Если подсчитать средние квадратические отклонения для опытов, выражаемых кривыми 1, 2 и 3 фиг. 5, то можно заметить, что эти отклонения от среднего значения величины смещения кажущегося источника достигают максимума тогда, когда кажущийся источник звука занимает среднее положение между громкоговорителями. Высказанное соображение хорошо иллюстрируется фиг. 7, на которой приведены кривые среднего квадратического отклонения от положения кажущегося источника звука  $\sigma$  в зависимости от  $x''/l$ . Кривые 1, 2, 3 отвечают соответственно значениям  $x''/l$ , равным 0; 0,5 и 1,0. Сплошные кривые соответствуют времени реверберации  $T = 2,8$  сек, пунктирные —  $T = 0,7$  сек. Легко видеть, что среднее квадратическое отклонение ( $\sigma$ ) при одном и том же значении  $x''/l$  имеет тем большее значение, чем больше смещение слушателя от оси симметрии. Таким образом, точность локализации кажущегося источника падает, во-первых, по мере приближения этого источника к середине расстояния между действительными источниками и, во-вторых, по мере смещения слушателя все дальше от осевой линии системы. Фиг. 7 позволяет также установить зависимость точности локализации кажущегося источника звука от времени реверберации. Средние квадратические отклонения при  $T = 0,7$  сек меньше, чем при  $T = 2,8$  сек; отсюда следует вывод о большей точности локализации источника в помещениях, имеющих меньшую реверберацию.

Попытаемся представить в математическом виде зависимость между положением кажущегося источника и разностью уровней для случая, когда слушатели размещаются в стороне от оси симметрии системы.

Рассматривая кривые  $N = f(x''/l)$  для случая размещения слушателей вдоль линии параллельной оси симметрии на расстоянии  $x''/l = 0,5$  от последней (сплошные линии на фиг. 8), замечаем, что они могут быть представлены уравнением, подобным (1), при условии, что начало координат для каждой из них будет несколько смещено. Учитывая это и пользуясь методом наименьших средних ошибок, кривую 2 фиг. 8, например, можно представить в следующей математической форме:

$$N_2 = -7,0 + 1,64 \operatorname{sh} 2,6 (x''/l + 0,02). \quad (3)$$

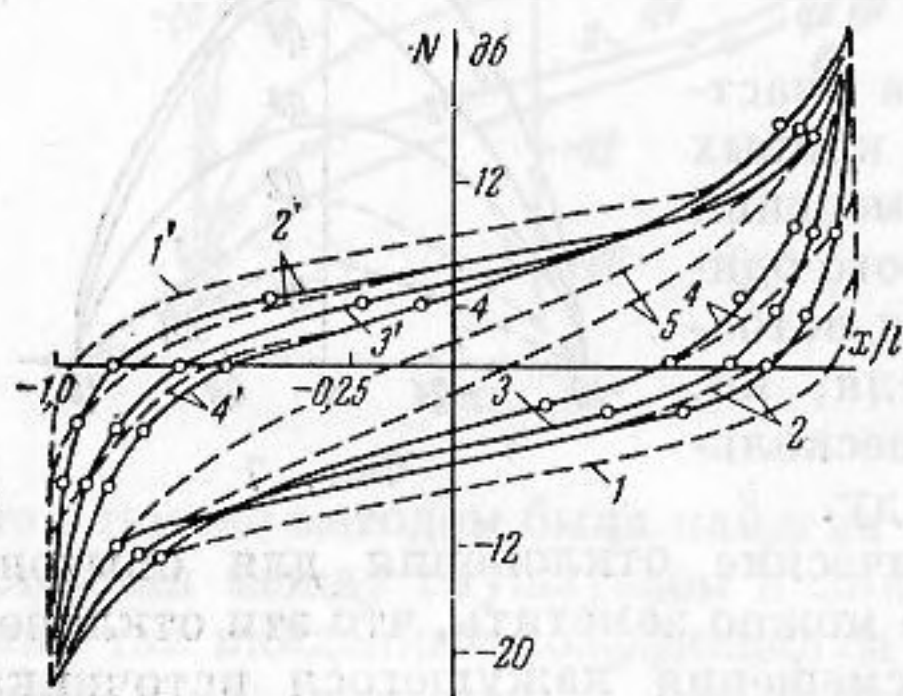
Тем же способом оказалось возможным представить и остальные экс-

периментальные кривые фиг. 8 в виде

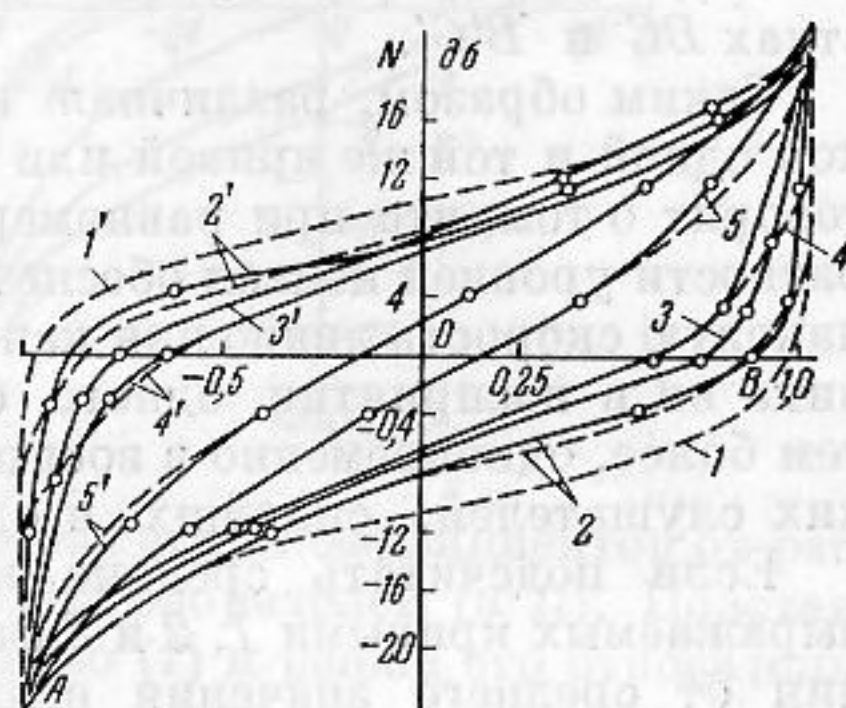
$$N_2 = -5,8 + 2,3 \operatorname{sh} 2,4 (x'/l + 0,04), \quad (4)$$

$$N_2 = -5,4 + 2,9 \operatorname{sh} 2,23 (x'/l + 0,08). \quad (5)$$

Нетрудно заметить, что экспериментальные кривые фиг. 8, построенные при значениях  $y''/l$ , равных 2, 3 и 4, выражаются однотипными уравнениями (3), (4) и (5), отличающимися друг от друга только коэффициентами. Следовательно, определив связь, существующую между этими коэффициентами и величиной  $y''/l$ , можно найти зависимость между разностью уровней силы звука, с одной стороны, и расстоянием между слушателем и линией громкоговорителей, а также положением кажущегося источника — с другой.



Фиг. 8



Фиг. 9

Фиг. 8. Кривые положения кажущегося источника звука для слушателей, смещенных относительно оси системы на  $x''/l = 0,5$  и находящихся от линии громкоговорителей на расстоянии  $y''/l$ , равном:

1 — 0; 2 — 2; 3 — 3; 4 — 4; 5 — 8. Сплошные линии — экспериментальные кривые, прерывистые — расчетные

Фиг. 9. То же, что на фиг. 8 для случая  $x''/l = 1,0$

Представляя сначала графически, а потом аналитически зависимость всех четырех коэффициентов от расстояния  $y''/l$ , можно получить следующую формулу, определяющую положение кажущегося источника, воспринимаемое любым слушателем, сидящим вдоль линии параллельной оси на расстоянии от нее  $x''/l = 0,5$

$$x'/l = \frac{\operatorname{ar sh} [N_2 - 0,7 (y''/l - 12)] e^{-0,26y''/l}}{3 - 0,19 y''/l} - 0,01 y''/l \quad (6)$$

Расчетные кривые, построенные по формуле (6) с учетом того, что она справедлива только при значениях  $x'/l$ , меньших чем  $\pm 1,0$ , представлены прерывистыми линиями на фиг. 8.

Сравнивая экспериментальные кривые этой фигуры с соответствующими расчетными кривыми, замечаем, что они повторяют друг друга только на участках от  $x'/l = -0,9$  до  $x'/l = +0,9$ . Отрезки за пределами указанного участка на экспериментальных кривых имеют значительно большую крутизну, чем на расчетных кривых. Однако это не является существенным, так как отрезки кривых, имеющие отмеченное несоответствие, относительно малы.

Если построить экспериментальные кривые  $N = f(x'/l)$ , снятые при условии, что слушатели смещены параллельно оси симметрии на расстояние  $x''/l = 1,0$ , то они представятся так, как это показано на фиг. 9. Для

этих экспериментальных кривых справедлива следующая эмпирическая формула:

$$x'/l = \frac{\operatorname{ar sh} 0,64 (N_3 - 0,9 y''/l + 11) e^{-0,174 y''/l}}{2,75 - 0,09 y''/l} - 0,01 y''/l. \quad (7)$$

Сравнение соответственных экспериментальных и расчетных кривых фиг. 9 показывает, что, так же, как и при  $x''/l = 0,5$ , в данном случае эмпирическая формула дает точные результаты только при перемещении кажущегося источника в пределах  $x'/l = \pm 0,9$ . Однако эти пределы все больше расширяются по мере увеличения расстояния между слушателем и линией громкоговорителей и уже при расстоянии  $y''/l = 8$  (кривая 5) расхождения между экспериментальными и расчетными кривыми почти не обнаруживаются.

Как видно из фиг. 8 и 9, смещение слушателя в сторону от оси симметрии приводит к тому, что он почти не воспринимает движения кажущегося источника звука до тех пор, пока уровень силы звука ближайшего к нему громкоговорителя будет выше уровня удаленного громкоговорителя. Когда же уровень ближайшего громкоговорителя станет ниже уровня удаленного громкоговорителя, кажущийся источник начинает перемещаться с тем большей скоростью, чем больше расстояние от слушателя до оси и меньше расстояние между ним и линией громкоговорителей. При некоторых определенных значениях последних расстояний скорость движения кажущегося источника становится настолько большой, что само движение воспринимается как скачок.

Следует отметить, что, как это видно из фиг. 8 и 9 (кривые 5), при большом удалении от системы ( $y''/l \geq 8$ ) восприятие слушателя очень мало зависит от его перемещения относительно оси системы.

Сходство формул (2), (6) и (7) позволяет считать, что различие их численных коэффициентов обусловлено только различными значениями  $x''/l$ , которым соответствует каждая из этих формул. Следовательно, находя известными математическими способами значения этих коэффициентов, в функции расстояния между слушателем и осевой линией, можно найти общее выражение, определяющее положение кажущегося источника звука при любой разности уровней действительных источников и любом местоположении слушателя. Это общее выражение представляется как

$$x'/l = \frac{\operatorname{ar sh} \frac{1}{x''/l + 0,54} [N + 4,55 \operatorname{ar sh} 5,9 x''/l - 0,65 y''/l \operatorname{ar sh} 2,1 x''/l] e^{-0,45 y''/l} \cdot e^{-x''/l}}{3,28 e^{-0,2 x''/l} + 0,77 e^{-7,5 x''/l} - 0,35 y''/l \cdot e^{-1,33 x''/l} - 0,01 y''/l}. \quad (8)$$

При использовании формулы (8) в пределах  $-1 \geq x''/l \leq +1$  расчетные данные получаются близкими к экспериментальным.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Положение кажущегося источника звука, наблюдаемое слушателем, зависит не только от разности уровней силы звука действительных источников, но и от координат точки наблюдения. Чем дальше слушатель от оси симметрии и ближе к линии громкоговорителей, тем больше смещается кажущийся источник к одному из своих крайних положений. Различие в положении кажущегося источника, определяемом слушателями, находящимися на разных концах одного и того же ряда, при расстоянии от этого ряда до линии громкоговорителей  $y''/l = 2$  достигает 80—90% и при расстоянии  $y''/l = 40$  — 60%;

2. Локализация кажущегося источника становится все менее точной по мере приближения его к своему среднему положению, смещения слушателей в сторону от оси симметрии и увеличения времени реверберации в помещении, в котором создается стереофонический эффект. В частности, смещение слушателя с осевой линии в сторону на расстояние  $x''/l = \pm 1$  уменьшает точность локализации примерно в 2 раза, а увеличение вре-

мени реверберации с 0,7 до 2,8 сек приводит почти к трехкратному снижению этой точности;

3. Перемещение кажущегося источника не пропорционально изменению разности уровней силы звука громкоговорителей. Наибольшая нелинейность зависимости между  $x'/l$  и  $N$  наблюдается на крайних участках пути движения кажущегося источника. Указанная зависимость становится все более линейной по мере удаления слушателя от линии громкоговорителей и его приближения к осевой линии системы;

4. При одной и той же скорости изменения разности уровней силы звука скорость перемещения кажущегося источника для различных точек наблюдения будет разной и, более того, изменяющейся в значительных пределах, особенно в случае большого удаления слушателя от оси симметрии системы или приближения его к линии громкоговорителей.

В заключение можно сделать общий вывод о том, что двухканальная стереофоническая система не может быть рекомендована для звукового кинематографа, так как она не обеспечивает для слушателей полного совпадения зрительного и слухового образов. Звучание, соответствующее видимому на экране объекту, будет восприниматься ими из различных точек экрана, часто очень удаленных от изображения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. П. Г. Тагер. Вторичное поле при стереофонической двухканальной передаче и некоторых фиксированных положениях источника звука в первичном поле. Акуст. ж., 1955, 1, 3, 286—293.
2. Я. Ш. Вахитов, В. С. Маньковский. Искажения в передаче движения источника звука при стереофоническом звуковоспроизведении. Акуст. ж., 1957, 3, 2, 115—126.
3. Я. Ш. Вахитов, В. С. Маньковский. О форме характеристик направленности микрофонов для стереофонической звукопередачи. Акуст. ж., 1957, 3, 2, 109—114.
4. V. L. Jordan. A sistem for stereofonic reproduction. Acustica, 1954, 1, 4, 36—38.

Ленинградский институт  
киноинженеров

Поступила в редакцию  
4 апреля 1957 г.