АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том IX 1963 Вып. 1

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ КАРТИНЫ НА ОСИ СИММЕТРИИ ДВУХКАНАЛЬНОЙ СИНФАЗНОЙ СТЕРЕОФОНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

П. Г. Тагер

Исследовано акустическое поле на оси симметрии двухканальной синфазной стереофонической системы в том случае, если колебания, возбуждаемые обоими громкоговорителями, считаются когерентными. Теоретически установлено, что при указанных условиях суммарные колебания около любой точки оси симметрии являются прямолинейными и происходят так, как если бы на прямой, соединяющей громкоговорители, был бы расположен действительный источник звука. Вычисленные положения кажущегося источника звука хорошо согласуются с экспериментальными данными, известными из литературы.

При наличии в акустическом поле одного источника звука, частицы среды в любой точке поля совершают прямолинейные колебания, направление которых совпадает с направлением от источника звука к данной точке, независимо от частоты и амплитуды колебаний. Если при стереофонической передаче частицы также совершали бы прямолинейные колебания около каких-то точек вторичного поля, то это означало бы, что в таких точках может восстанавливаться физическая картина первичного поля и однозначно определяться направление локализации кажущегося источника звука. Сравнением физических картин вторичного и первичного звуковых полей занимались Кларк, Даттон и Вандерлин [1] и Даттон [2]. Целью данной статьи является дополнительное исследование акустического поля на оси симметрии двухканальной синфазной стереофонической системы.

Два громкоговорителя P_1 и P_2 на фиг. 1 находятся на оси ординат y и расположены симметрично относительно оси x на расстоянии $\pm r_1$ от начала координат O_2. Оба громкоговорителя синфазно излучают звуковые колебания с круговой частотой ω. Пусть амплитуды прямолинейных колебаний, возбуждаемых громкоговорителями на расстоянии l_0 от каждого из них, будут соответственно B_{10} и B_{20}. В таком случае амплитуды прямолинейных колебаний, возбуждаемых в точке S, находящейся на оси x на расстоянии b от начала координат, будут

$$B'_{s0} = B_{10} \frac{l_0}{\sqrt{b^2 + r_1^2}}, \tag{1}$$

$$B''_{s0} = B_{20} \frac{l_0}{\sqrt{b^2 + r_1^2}}. \tag{2}$$

Будем считать положительными углы, получающиеся при вращении против движения часовой стрелки при переходе от направления «громкоговоритель — исследуемая точка» к положительному направлению оси абсцисс. Тогда положительные мгновенные значения смещений частиц среды, обусловленные составляющими вдоль оси абсцисс, надо откладывать в положительном направлении оси абсцисс, а получающиеся положительные мгновенные значения смещений частиц среды, обуслов-

ленные составляющими вдоль оси ординат, надо откладывать в отрицательном направлении оси ординат. В соответствии с этим можно написать выражения для мгновенных значений смещений частиц среды вдоль осей координат в точке S под воздействием каждого громкоговорителя P_1 и P_2 в отдельности, а именно

$$B_{1x} = B_{10} \frac{l_0 b}{b^2 + r_1^2} \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{c}\sqrt{b^2 + r_1^2}\right), \tag{3}$$

$$B_{2x} = B_{20} \frac{l_0 b}{b^2 + r_1^2} \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{c}\sqrt{b^2 + r_1^2}\right), \tag{4}$$

$$B_{1y} = B_{10} \frac{l_0 r_1}{b^2 + r_1^2} \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{c}\sqrt{b^2 + r_1^2}\right), \tag{5}$$

$$B_{2y} = -B_{20} \frac{l_0 r_1}{b^2 + r_1^2} \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{c}\sqrt{b^2 + r_1^2}\right), \tag{6}$$

где t — время и c — скорость звука в воздухе.

Одинаковые фазы $\frac{\omega}{c}\sqrt{b^2 + r_1^2}$ в этих четырех формулах обусловлены синфазностью колебаний громкоговорителей P_1 и P_2 и тем, что мы считаем равной нулю фазу их колебаний в момент начала отсчета времени.

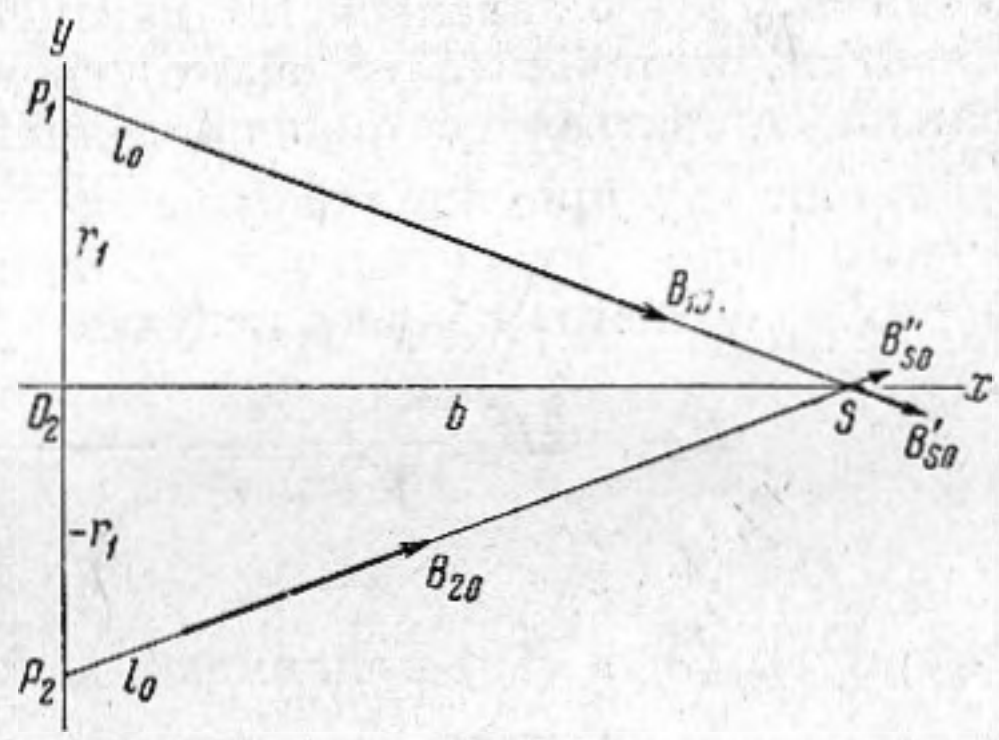
Теперь мы можем написать выражения для мгновенных значений смещений вдоль осей координат частиц среды от точки S под одновременным воздействием обоих громкоговорителей во вторичном поле. Считая колебания, возбуждаемые обоими громкоговорителями в точке S, когерентными, находим

$$B_x = B_{20} \frac{l_0 b}{b^2 + r_1^2}\left(\frac{B_{10}}{B_{20}} + 1\right) \times$$

$$\times \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{c}\sqrt{b^2 + r_1^2}\right), \tag{7}$$

$$B_y = B_{20} \frac{l_0 r_1}{b^2 + r_1^2}\left(\frac{B_{10}}{B_{20}} - 1\right) \times$$

$$\times \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{c}\sqrt{b^2 + r_1^2}\right). \tag{8}$$



Фиг. 1

Таким образом, амплитуды составляющих вдоль осей координат колебаний частиц среды в точке S под одновременным воздействием обоих громкоговорителей P_1 и P_2 во вторичном поле будут

$$B_{x0} = B_{20} \frac{l_0 b}{b^2 + r_1^2}\left(\frac{B_{10}}{B_{20}} + 1\right), \tag{9}$$

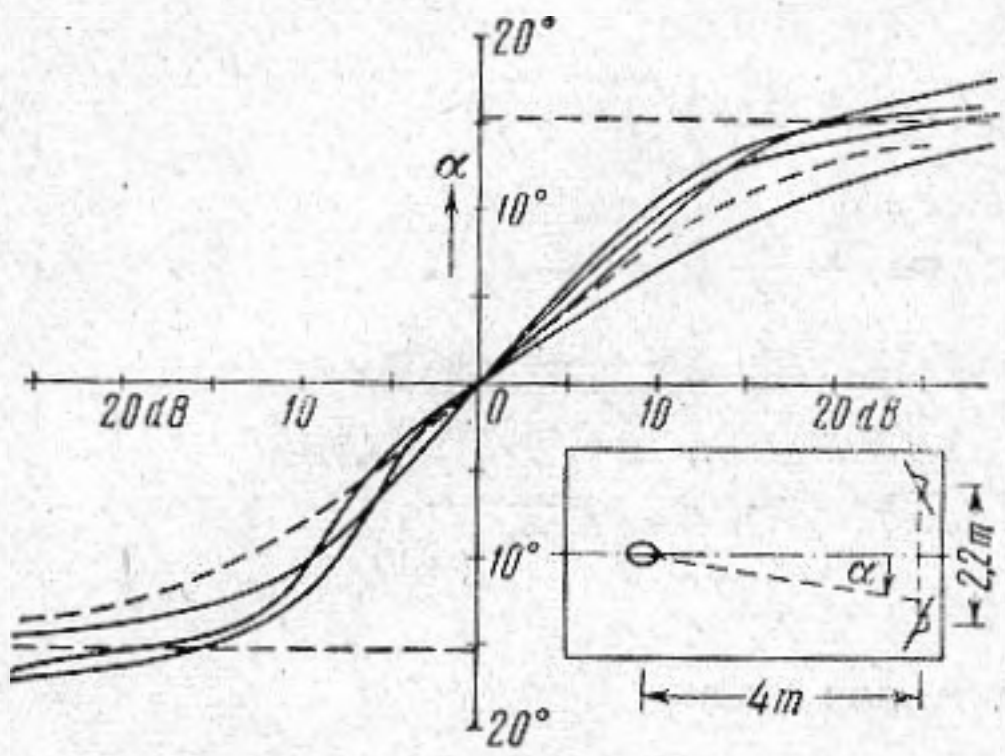
$$B_{y0} = B_{20} \frac{l_0 r_1}{b^2 + r_1^2}\left(\frac{B_{10}}{B_{20}} - 1\right). \tag{10}$$

Отметим очень интересную особенность этих двух формул. Продолжение вектора, являющегося геометрической суммой этих двух векторов, пересекает ось ординат в точке, определяемой значением ординаты

$$r = r_1 \frac{\frac{B_{10}}{B_{20}} - 1}{\frac{B_{10}}{B_{20}} + 1}. \tag{11}$$

Как видим, это выражение не зависит ни от b, т. е. от положения точки S на оси симметрии x между обоими громкоговорителями P_1 и P_2, ни от круговой частоты ω звуковых колебаний.

На фиг. 2, заимствованной из статьи Йордана [3], сплошными линиями показаны найденные им экспериментальным путем для различных лиц зависимости положения кажущегося источника звука от разности уровней энергий, излучаемых двумя синфазно работающими громкоговорителями. Пунктирная кривая интерпретирует ту же зависимость, но вычисленную по формуле, аналогичной (11), при взаимном расположении громкоговорителей и слушателя, показанном на той же фигуре. Как видим, получается хорошее совпадение экспериментальных и теоретически вычисленных результатов. Горизонтальные пунктирные прямые, введенные в этот же чертеж, соответствуют максимальным значениям угла α.



Фиг. 2

Нас интересует характер изменения колебаний в точке S в зависимости от разности уровней $20 \lg B_{10}/B_{20}$ энергий, излучаемых обоими громкоговорителями. Потребуем дополнительно, чтобы при изменении отношения B_{10}/B_{20} оставалась бы неизменной суммарная энергия, воспринимаемая в точке S от обоих громкоговорителей P_1 и P_2. Тогда должна оставаться постоянной величина $Bx_0^2 + By_0^2$. Обозначим через B'_{20} амплитуду прямолинейных колебаний частиц среды, возбуждаемых каждым громкоговорителем в отдельности на расстоянии l_0 от каждого из них, т. е. когда оба они излучают равные звуковые энергии. Находим

$$B_{20} = 2B'_{20} \frac{b}{\sqrt{b^2 + r_1^2}} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{B_{10}}{B_{20}} + 1\right)^2 - \frac{4r_1^2}{b^2 + r_1^2} \frac{B_{10}}{B_{20}}}} \tag{12}$$

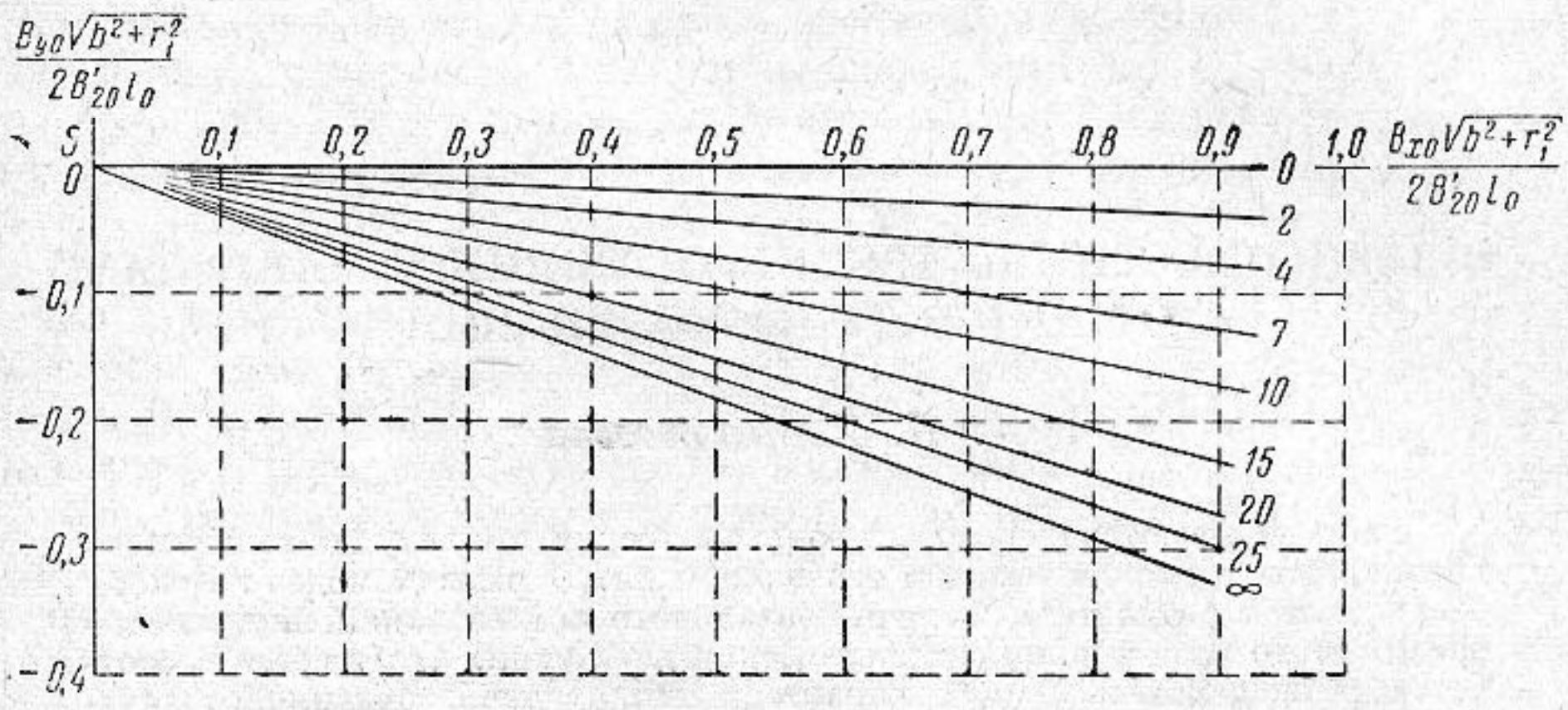
и формулы (9) и (10) принимают вид:

$$\frac{B_{x0}\sqrt{b^2 + r_1^2}}{2B'_{20} l_0} = \frac{b^2}{b^2 + r_1^2} \frac{B_{10}/B_{20} + 1}{\sqrt{\left(\frac{B_{10}}{B_{20}} + 1\right)^2 - \frac{4r_1^2}{b^2 + r_1^2} \frac{B_{10}}{B_{20}}}}, \tag{13}$$

$$\frac{B_{y0}\sqrt{b^2 + r_1^2}}{2B'_{20} l_0} = \frac{b r_1}{b^2 + r_1^2} \frac{B_{10}/B_{20} - 1}{\sqrt{\left(\frac{B_{10}}{B_{20}} + 1\right)^2 - \frac{4r_1^2}{b^2 + r_1^2} \frac{B_{10}}{B_{20}}}}. \tag{14}$$

Для иллюстрации на фиг. 3 показаны векторы суммарных колебаний, вычисленные по их составляющим (13) и (14) в относительных единицах, отложенных на этом чертеже по осям координат. Эти вычисления были сделаны для положения громкоговорителей и точки S, определяемых размерами $r_1 = 5{,}5$ *м* и $b = 15$ *м*. Числа возле векторов определяют разность уровней $20 \lg B_{10}/B_{20}$ энергий, излучаемых обоими громкоговорителями. Когда работает только один громкоговоритель P_1, то $B_{20}=0$ и отношение B_{10}/B_{20} становится бесконечно большим, а выражения (13) и (14) становятся неопределенными. Для раскрытия этих неопределенностей надо сначала числители и знаменатели дробей в правых частях выражений (13) и (14) умножить на B_{20}, сделать необходимые преобразования и только после этого считать $B_{20} = 0$.

На фиг. 3 показаны векторы только для нулевого и положительных значений $20 \lg B_{10}/B_{20}$. Векторы для отрицательных значений будут на фиг. 3 зеркальными изображениями в оси абсцисс соответствующих векторов для положительных значений и для упрощения не показаны.



Фиг. 3

Из приведенных теоретических материалов можно сделать выводы применительно к двухканальной синфазной стереофонической системе.

1. Суммарные колебания, возбуждаемые около любой точки на оси симметрии между обоими громкоговорителями, являются прямолинейными.

2. Векторы суммарных прямолинейных колебаний около любой точки, находящейся на оси симметрии между обоими громкоговорителями, расположены так, что их продолжения пересекаются в одной точке на прямой линии, проходящей через оба громкоговорителя и, следовательно, воссоздается физическая картина, которая получалась бы и в том случае, если в этой точке пересечения продолжений векторов находился бы действительный источник звука.

3. Положение точки пересечения продолжений векторов не зависит от общего уровня энергии, излучаемой обоими громкоговорителями, т. е. положение кажущегося источника звука не зависит от его громкости.

4. Положение точки пересечения продолжений векторов не зависит от частоты звуковых колебаний.

5. Расстояние точки пересечения продолжений векторов от середины между громкоговорителями пропорционально расстоянию между ними.

6. По мере изменения отношения звуковых энергий, излучаемых обоими громкоговорителями, все векторы поворачиваются около соответствующих точек вторичного поля и поэтому положение точки пересечения продолжений векторов сильно зависит от отношения звуковых энергий.

Изложенными очень простыми обстоятельствами можно легко объяснить известные из экспериментов особенности двухканальных синфазных стереофонических систем и очень хороший эффект локализации кажущегося источника звука, наблюдаемый на оси симметрии между обоими громкоговорителями.

ЛИТЕРАТУРА

1. H. A. M. Clark, G. F. Dutton, P. B. Vanderlyn. The stereosonic recording and reproducing system. Proc. Inst. Elect. Eng., 1957, 104, 17, 417—432.
2. G. F. Dutton. The assessment of two-channel stereophonic reproduction performance in studio monitor rooms, living rooms and small theatres. J. Audio Eng. Soc., 1962, **10**, 2, 98—105.
3. V. L. Jordan. A system for stereophonic reproduction. Acustica, 1954, 4, 1, 36—38.

Всесоюзный н.-и. кино-фотоинститут
Москва

Поступила в редакцию
23 апреля 1962 г.