

ЛИНЗА ДЛЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН В ВОЗДУХЕ

Изготовить линзу обычного типа, эффективно фокусирующую акустические волны, распространяющиеся в воздухе, практически очень сложно. Дело в том, что большое различие акустических сопротивлений ρv воздуха и любого твердого материала, из которого изготовлена сама линза или ее стенки, приведет к тому, что почти вся энергия падающей волны будет отражена от поверхности линзы и усиления приема в точке, где фокусируются лучи, наблюдаться не будет. И в самом деле, имеющиеся в литературе¹ описания звуковых линз и прием показывают, что их авторы — Гезехус, Тиндаль, Поль — пользовались в качестве наполнителя линзы углекислым газом, стенками из пленки коллодия или тонкого шелка, либо сеткой, наполненной пухом и т. д. Положение меняется коренным образом, если применить при изготовлении линзы волноводный принцип и добиваться выполнения условия таутохронизма не за счет укорочения длины волны в веществе линзы, а за счет искусственного увеличения длины пути, проходимого волной в волноводном канале, по сравнению с ее движением в свободном пространстве.

Впервые этот метод был применен, насколько нам известно, У. Коком (см. ²). Им была изготовлена линза из наклонно расположенных сегментов, имеющая, как видно из рис. 1, эффективный показатель преломления $n = kL/ML = 1/\cos \theta$, учитывающий относительное удлинение пути, проходимого волной в волноводе, по сравнению с движением в свободном пространстве. Некоторым недостатком линзы такого типа является то, что, поместив источник в фокусе линзы, получим плоский фронт волны, но интенсивность по фронту распределена неравномерно. Большая интенсивность будет в той части полуплоскости фронта, к которой наклонены сегменты.

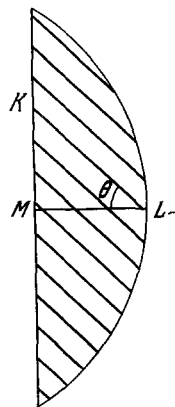


Рис. 1.

Другая возможность, использованная нами, состоит в том, что из гофрированных пластин кровельного железа, алюминия или папье-маше, имеющих форму шаровых полусегментов, собирают линзу, профиль которой показан на рис. 2. При этом снова получим эффективный показатель преломления, равный относительному возрастанию длины пути в волноводе.

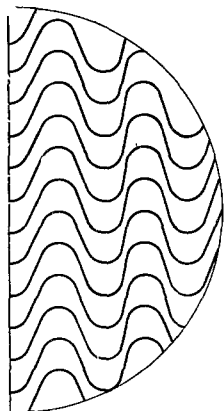


Рис. 2.

Изгибам гофрированной поверхности проще всего придать форму полуцилиндров. В этом случае показатель преломления $n = \pi r/2r = 1,57$. Если придать синусоидальный профиль, то в этом случае необходимо вычислить длину дуги синусоиды, что приводит к эллиптическому интегралу, который не может быть выражен в элементарных функциях, но, конечно, может быть вычислен. Для профиля в виде равнобедренного треугольника с высотой, равной половине основания, получим $n = a \sqrt{2}/a = 1,41$ и т. д.

В нашем исполнении акустическая линза представляет собой набор гофрированных пластин с небольшим плоским начальным участком, а поверхность, огибающая края пластин, является полусферой. Заготовки пластин имеют сложную конфигурацию, и поэтому для получения их выкроек применялся графо-аналитический метод развертки пересечений цилиндрических поверхностей со сферой. Полученные заготовки формировались в гофрированные пластины на простейшем приспособлении, состоящем из ряда труб, размер которых соответствует диаметру цилиндрических поверхностей гофрированных пластин. Эти трубы с двух сторон, через одну, были приварены к жесткому основанию, и таким образом получились своеобразный формовочный станок. Заготовка из листового железа прикреплялась к первой трубе станка, а съемные трубы последовательно вдавливались, и

получалась изогнутая пластина, которая попеременно, вручную на трубе меньшего диаметра и в формовочном станке доводилась до такого состояния, что при вынимании из формовочного станка она полностью сохраняла приданную ей форму. В последующем пластины нализывались просверленными отверстиями на соединительные стержни с трубками-прокладками между ними. Полученная таким образом конструкция действует как линза.

Радиус кривизны цилиндрической гофрированной поверхности взят равным 20 мм, расстояние между соседними пластинами также составляет 20 мм.

Демонстрацию проводят так: от звукового генератора ГЗ-1 подается сигнал на динамик 0,5-ГД. Прием ведут на микрофон. Напряжение с микрофона поступает на усилитель У2-1А (28-ИМ), а с его выхода — на осциллоскоп С1-1 (ЭО-7).

Поместив на пути волны акустическую линзу в такое положение, чтобы звуковые волны фокусировались на микрофоне, наблюдаем значительное усиление приема, на частоте 6—8 кГц амплитуда приемного сигнала возрастает примерно в четыре раза.

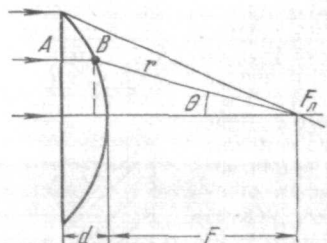


Рис. 3.

Изготовленная нами линза имеет апертуру 40 см, радиус кривизны $R = 20$ см, т. е. сечение в виде полушеры (рис. 3). Фокусное расстояние линзы определяется по обычной формуле

$$1/F = (n - 1)(R_1^{-1} + R_2^{-1}),$$

что дает при $n = 1,5$ фокусное расстояние $F = 40$ см.

Гофрированная линза, ограниченная сферической поверхностью, не обеспечивает точного выполнения таутохронизма. Поэтому нами была изготовлена по тому же принципу вторая линза, удовлетворяющая требованию равенства «оптических» длин путей волн, проходящих через разные участки линзы и собирающихся в фокусе. Уравнение поверхности такой линзы в полярных координатах получают из следующих соотношений (рис. 3):

$$\begin{aligned} n \cdot AB + r &= \text{const} = nd + F, \quad AB = d + F - r \cos \theta, \\ r + n(d + F - r \cos \theta) &= nd + F, \quad r = F(n - 1)/(n \cos \theta - 1). \end{aligned}$$

Полученное уравнение представляет гиперболу, т. е. поверхность линзы является гиперболоидом вращения. Форма выкроек сегментов была найдена тем же графоаналитическим методом, путем нахождения профиля пересечения гиперболоида вращения с цилиндрической поверхностью. Затем сегменты подвергались гофрировке и из них была собрана линза, вид которой показан на рис. 4.

Усиление, даваемое линзой, составляет по амплитуде 5—6 раз на частоте

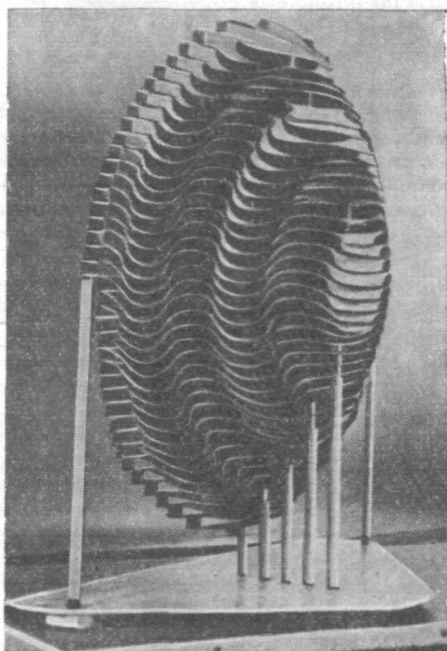


Рис. 4.

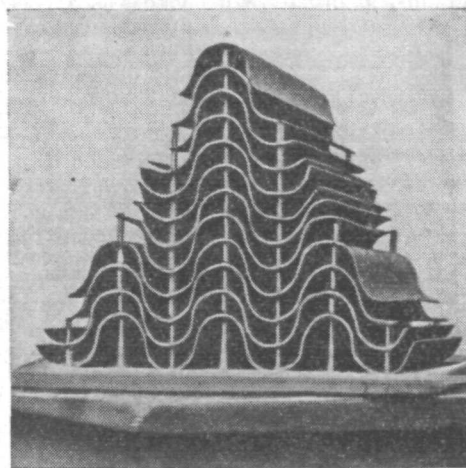


Рис. 5.

около 6 кГц. Облучают линзу динамиком 0,2-ГД, малый размер которого обеспечивает достаточно широкую диаграмму направленности, позволяющую «озвучить» всю поверхность линзы с апертурой 50 см и с фокусным расстоянием около 60 см. Расстояние от динамика до линзы в опыте 3,5—4 м. При демонстрации следует обратить внимание на то, чтобы линза не оказалась в узле стоячих волн, так как отражение от ее задней плоской поверхности и последующих изгибов довольно значительно.

Волны, проходящие по изогнутым волноводам, сечение которых то возрастает, то уменьшается, претерпевают довольно значительное ослабление. Видимо, этим объясняется тот факт, что усиление, даваемое таутохронной линзой, не превосходит

и даже несколько менее усиления, обусловливаемого фазовой зонной пластиной³. При отсутствии потерь энергии и идеальном таутохронизме такая линза должна обеспечить не только синфазность колебаний от четных и нечетных зон Френеля в целом, но и синфазность колебаний, приходящих от разных участков каждой зоны. Из-за этого векторная диаграмма, обусловленная фазовой зонной пластиной, преобразуется линзой так, что каждый полувиток таутохронной линзой выпрямляется.

В итоге амплитуда приема должна возрасти в $\pi R/2R = 1,57$ раза. Надо учесть, конечно, и то, что дискретное строение линзы не может обеспечить идеальный таутохронизм.

Изготовленная по тому же принципу гофрированная 60°-ная призма показана на рис. 5. Призма очень эффективно преломляет звуковые волны, отклоняя их на угол, близкий к 30°. Для показа действия призмы на динамик 0,5-ГД надевают бумажный конический рупор длиной около 30 см. Чтобы амплитуда приема была наибольшей, ось конуса на динамике и ось микрофона должны располагаться под 30°-ным углом. Убрав призму, наблюдают резкое ослабление приема.

Б. Ш. Перкальскис, В. Л. Ларин, М. Ф. Коношейдов

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. О. Д. Хвольсон, Курс физики, т. 2, М., ГИЗ, 1923; Дж. Тиндаль, Звук, М., ГИЗ, 1927; Р. Поль, Механика, акустика и учение о теплоте, М., Гостехиздат, 1957.
 2. В. Бекетов, Антенны сверхвысоких частот, М., Оборонгиз, 1957; W. E. Kosk, Proc. IRE 37, 852 (1949).
 3. Б. Ш. Перкальскис, В. Л. Ларин, УФН 96, 374 (1968).
-