

ЛЕКЦИЯ 3

Линии задержки на ПАВ

План

- 1 Свойства поверхностных акустических волн
- 2 Элементы акустического тракта
- 3 Линии задержки на ПАВ

1 Свойства поверхностных акустических волн

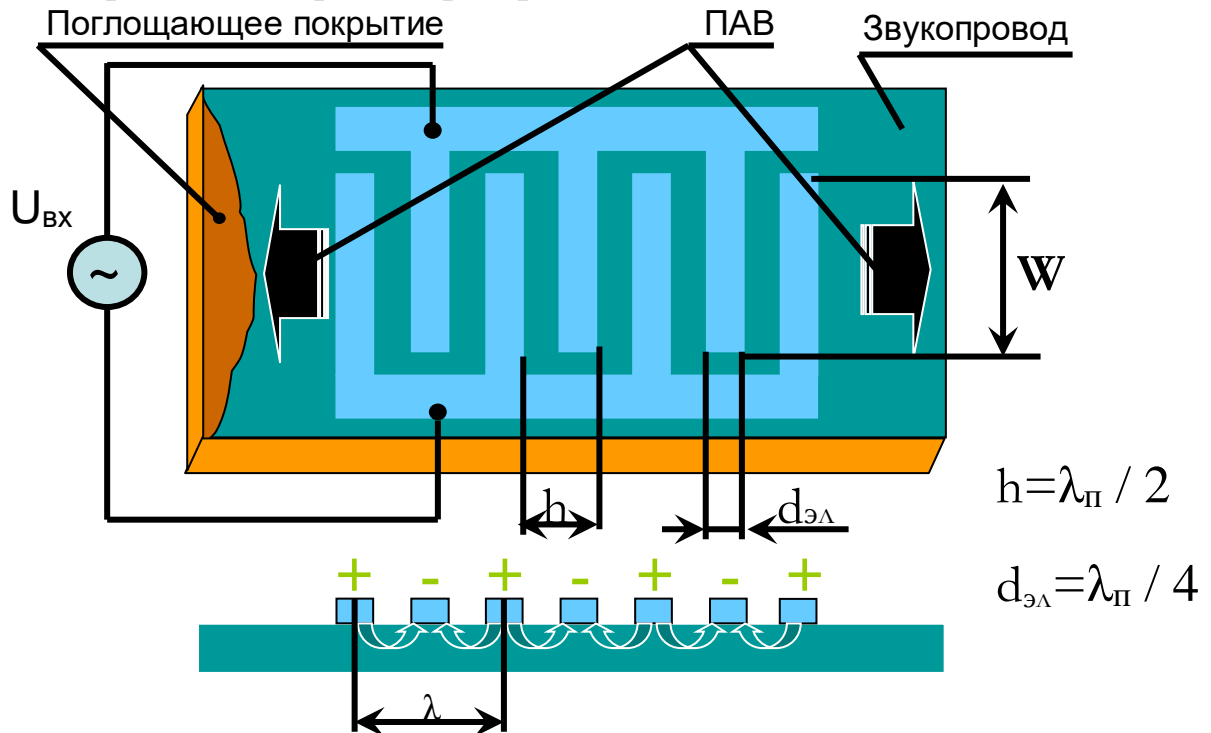
- *Поверхностные акустические волны* – это упругие возмущения, распространяющиеся в тонком приповерхностном слое твердого тела
- В акустоэлектронных устройствах поверхностная волна распространяется по поверхности звукопровода из пьезоэлектрика.
- Амплитуда ПАВ экспоненциально убывает с глубиной – 90 % переносимой энергии сосредоточено в слое глубиной не более одной длины волны;
- ПАВ имеют невысокую скорость распространения ($V_{\text{П}} = 1000 \dots 4000$ м/с, что на пять порядков меньше скорости света);
- Распространение ПАВ происходит без дисперсии и затухания до частот 1...1,5 ГГц;
- При распространении в кристаллах характеристики ПАВ зависят от направления распространения относительно кристаллографических осей;
- На величину затухания ПАВ влияет шероховатость поверхности звукопровода (размер неровностей не должен превышать одной сотой от длины волны), его омическое сопротивление, давление окружающей газовой среды и т.д.
- Наличие на поверхности пьезоэлектрика проводящих пленок вызывает дисперсию, частичное отражение ПАВ и изменение ее скорости. Величина дисперсии пропорциональна толщине пленки и частоте колебаний;
- Взаимодействие ПАВ с различными планарными структурами на поверхности звукопровода позволяет управлять характеристиками ПАВ и создавать различные устройства обработки сигналов, используя технологию интегральных микросхем.

Достоинства устройств на ПАВ:

- Планарная конструкция устройств на ПАВ сопрягается с конструкцией гибридных микросхем;
- Технология изготовления устройств на ПАВ совместима с технологией микросхем;
- Высокая повторяемость процессов литографии обеспечивает высокую повторяемость характеристик устройств на ПАВ при их массовом выпуске.

2 Элементы акустического тракта

2.1 Встречно - штыревой преобразователь



Характеристики встречно – штыревого преобразователя

- Двухфазный преобразователь (встречно – штыревой преобразователь – ВШП) представляет собой две группы тонкопленочных электродов размещенных на поверхности пьезоэлектрического звукопровода.
 - Каждая из групп объединена шинами, которые соединяют электроды с источником напряжения сигнала или с нагрузкой.
- $f_0 = V_{\text{п}} / 2h_{\text{эл}}; h_{\text{эл}} = \lambda_{\text{п}} / 2;$
- $\Delta f = 1/T = V_{\text{п}} / L = V_{\text{п}} / N\lambda_{\text{п}} = f_0 / N;$
- $\Delta f = f_0 / N$ – полоса пропускания по уровню 0,707H(f₀).
- N – число пар электродов
- Максимальное значение перекрытия преобразователя называется *апертурой преобразователя*.
 - У *неаподизованного* преобразователя значение перекрытия электродов одинаковое ($W = W_i$),
 - У *аподизованного* – изменяется вдоль протяженности преобразователя.
 - Форма импульсного отклика ВШП зависит от закона изменения перекрытия электродов вдоль его протяженности.
 - Преобразователь с постоянным шагом электродов называется *эквилидистантным*.
 - Преобразователь, шаг электродов у которого изменяется, называется *неэквилидистантным*.
 - Преобразователь является частотно – избирательным элементом.

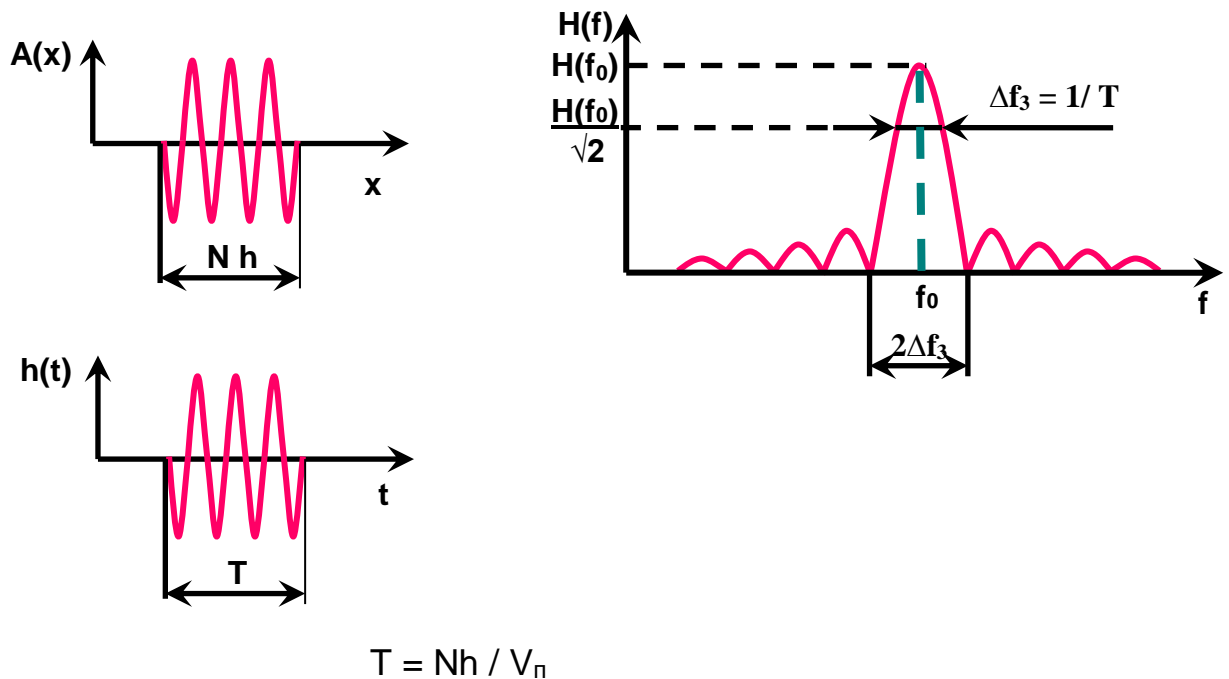
- Его амплитудно – частотная характеристика имеет максимум на частоте акустического синхронизма f_0 .
- Амплитудно – частотная характеристика одиночного ВШП описывается выражением

$$H(f) = NA \frac{\sin(\pi N \frac{f - f_0}{f_0})}{\pi N \frac{f - f_0}{f_0}}$$

где N – число пар электродов;

A – амплитуда волны, возбуждаемая парой соседних электродов.

Характеристики встречно – штыревого преобразователя



$$f_0 = V_{\pi} / 2h_{\text{эл}}; \quad h_{\text{эл}} = \lambda_{\pi} / 2;$$

$$\Delta f = 1/T = V_{\pi} / L = V_{\pi} / N\lambda_{\pi} = f_0 / N;$$

$\Delta f = f_0 / N$ – полоса пропускания по уровню $0,707H(f_0)$.

N – число пар электродов.

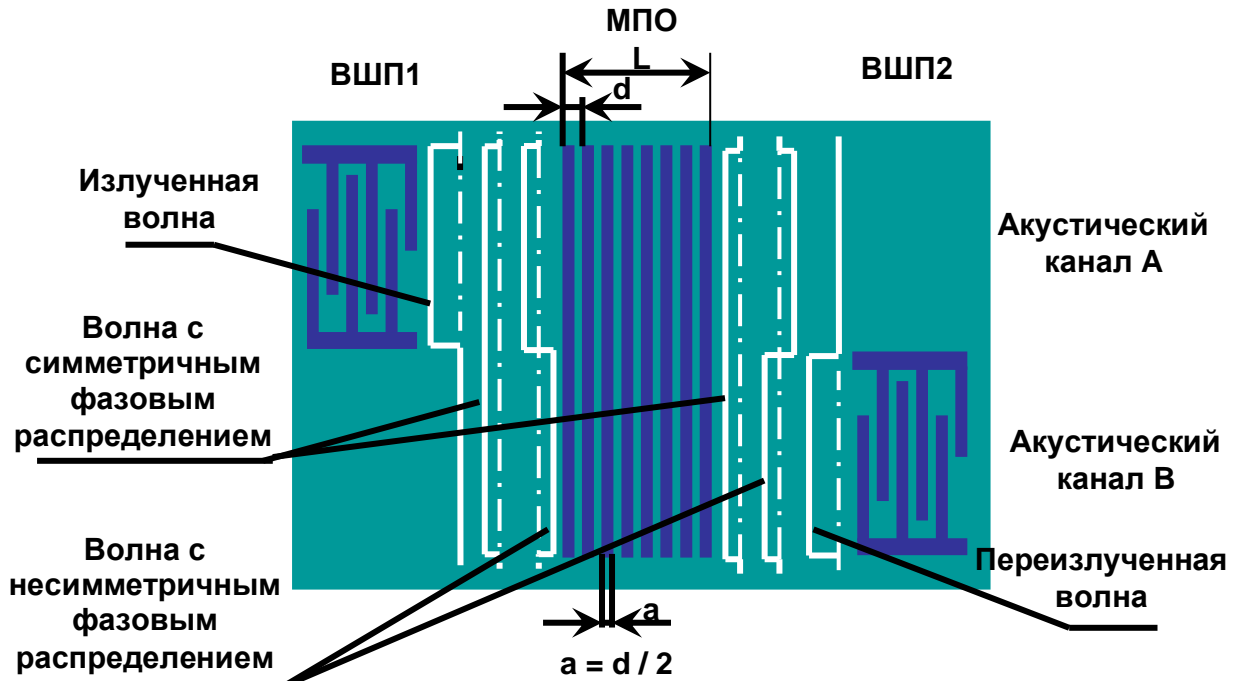
- Преобразователь является частотно – избирательным элементом.

- Полоса пропускания определяется числом пар электродов N и по уровню $0,707H(f_0)$ составляет:

$$\Delta f = \frac{f_0}{N}$$

Многополосковый ответвитель

- Многополосковый ответвитель (МПО) представляет собой систему идентичных проводящих электродов, расположенных параллельно волновому фронту ПАВ.
- Он используется для переизлучения энергии пространственной волны из одного канала в другой.



- Полное переизлучение энергии из канала в канал происходит при выполнении условия

$$|\omega/V_a - \omega/V_c| L_{\text{полн}} = \pi,$$

где V_a – фазовая скорость асимметричной волны;

V_c – фазовая скорость симметричной волны.

- После преобразования этого равенства получим

$$L_{\text{полн}} = V_c V_a / 2f(V_c - V_a).$$

- Считая, что

$$\Delta V = V_c - V_a, \quad \Delta V / V = k^2/2,$$

где k^2 – квадрат коэффициента электромеханической связи, получим

$$L_{\text{полн}} \approx \lambda / k^2.$$

- С учетом того, что МПО выполняется в виде системы электродов шириной $a = d / 2$, величину $L_{\text{полн}}$ необходимо увеличить приблизительно в два раза.

- Это вызвано тем, что приращение фазы за один период МПО равно

$$\theta = \omega d / V$$

и коэффициент электромеханической связи уменьшается в $[\sin(\theta/2) / \theta/2]$.

- Более точное выражение имеет вид

$$L_{\text{полн}} \approx (2\lambda / k^2) [(\theta/2) / \sin(\theta/2)]^2.$$

- Отсюда число элементов МПО

$$N_{\text{полн}} = L_{\text{полн}} / d = (2\lambda / dk^2) [(\theta/2) / \sin(\theta/2)]^2.$$

Многополосковые ответвители применяются

- для синтеза полосовых фильтров,
- для осуществления акустической связи между двумя акустически разобщенными звукопроводами,
- для изменения ширины апертуры акустической волны,
- перераспределения энергии волны,
- формирования волн с определенным фазовым сдвигом и др.

Отражательные структуры

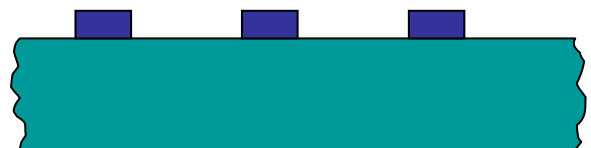
- Отражательные структуры образованы периодическими неоднородностями на поверхности звукопровода в зоне распространения волны.
- На границах неоднородностей изменяются условия распространения волны и происходит частичное отражение волны.
- В качестве элементов отражательной структуры используют топографические неоднородности –
 - пазы (канавки),
 - выступы на поверхности;
 - металлические или диэлектрические полоски.
- Обычно отражатель представляет собой решетку из нескольких сотен слабо отражающих элементов.

Элементы отражательных структур

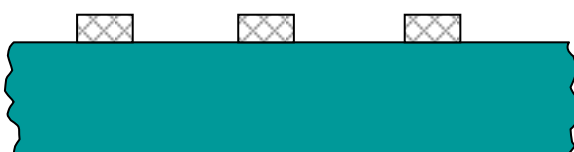
Канавки в звукопроводе



Металлические полоски на звукопроводе



Диэлектрические полоски



Ионноимплантированные полоски



В отражательных структурах используются различные механизмы отражения:

- отражение от геометрической неоднородности звукопровода;
- отражения вследствие инерционной (механической) нагрузки от материала неоднородности, упругие свойства которого отличны от свойств звукопровода;
- отражения от проводящих покрытий вследствие электрического закорачивания тангенциальной составляющей электрического поля ПАВ.

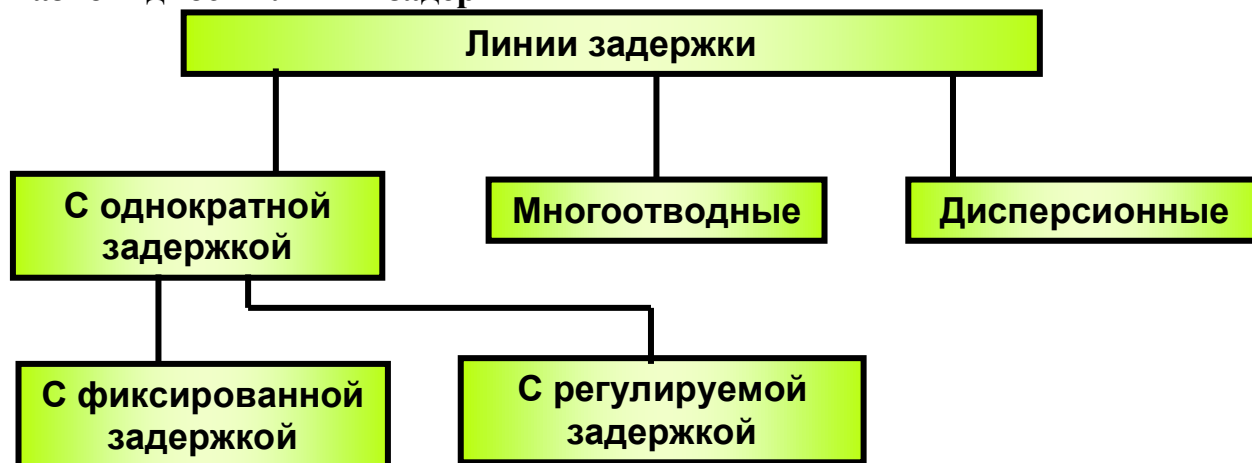
Отражательные структуры применяются для построения

- резонаторов на ПАВ,
- линий задержки
- дисперсионных линий задержек.

14.3 Линии задержки на ПАВ

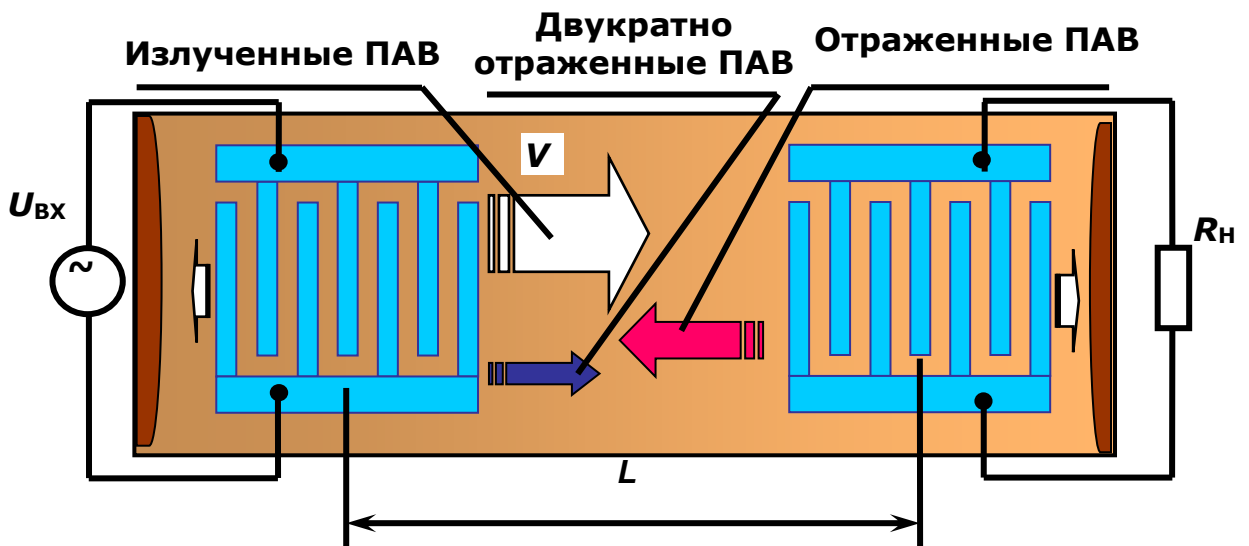
- Основное преимущество ЛЗ на ПАВ по сравнению с другими физическими реализациями:
- низкая скорость распространения волны;
- малые габаритные размеры.

Разновидности линий задержки

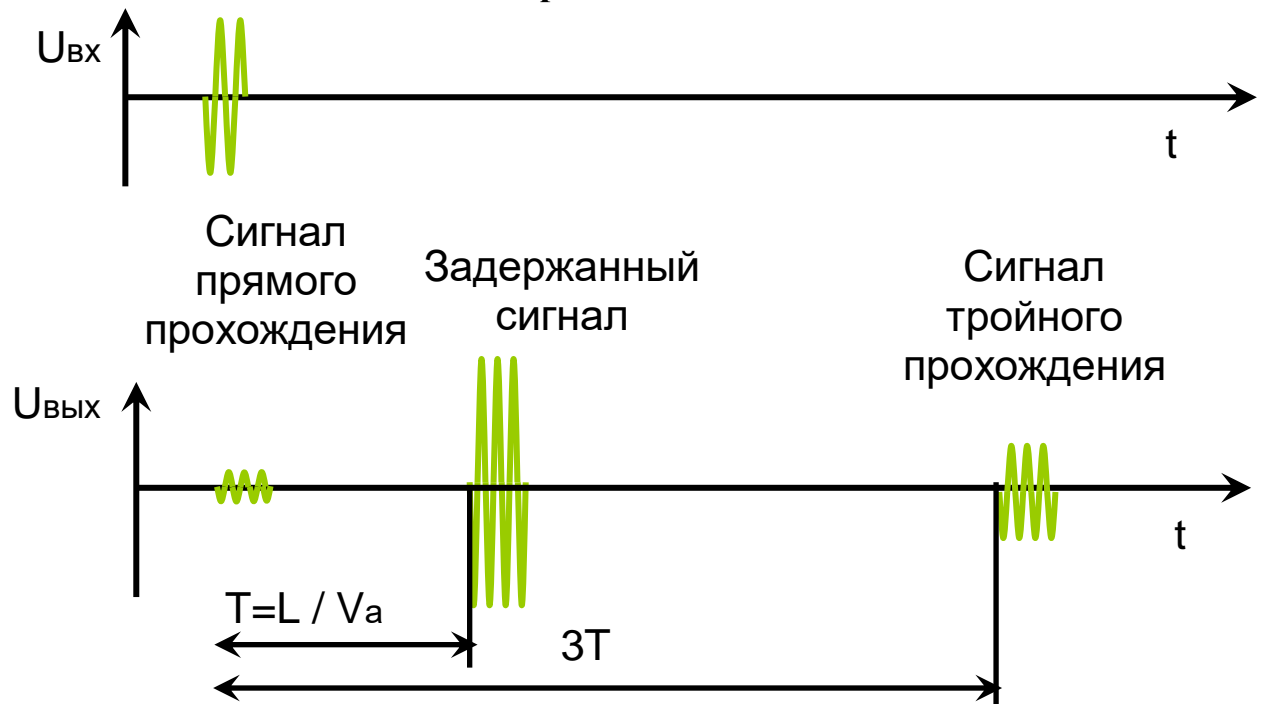


- К линиям с однократной задержкой относятся ЛЗ, имеющие один входной и один выходной преобразователи.
- Термин «однократная задержка» характеризует однократный или единичный съем (преобразование) распространяющейся в звукопроводе волны.
- В линиях задержки со средним (до 100—150 мкс) временем задержки чаще используют традиционную простую конструкцию с размещением входного и выходного ВШП в общем прямолинейном акустическом потоке на одной поверхности звукопровода.

Линия с однократной задержкой



Сигналы на выходе линии задержки



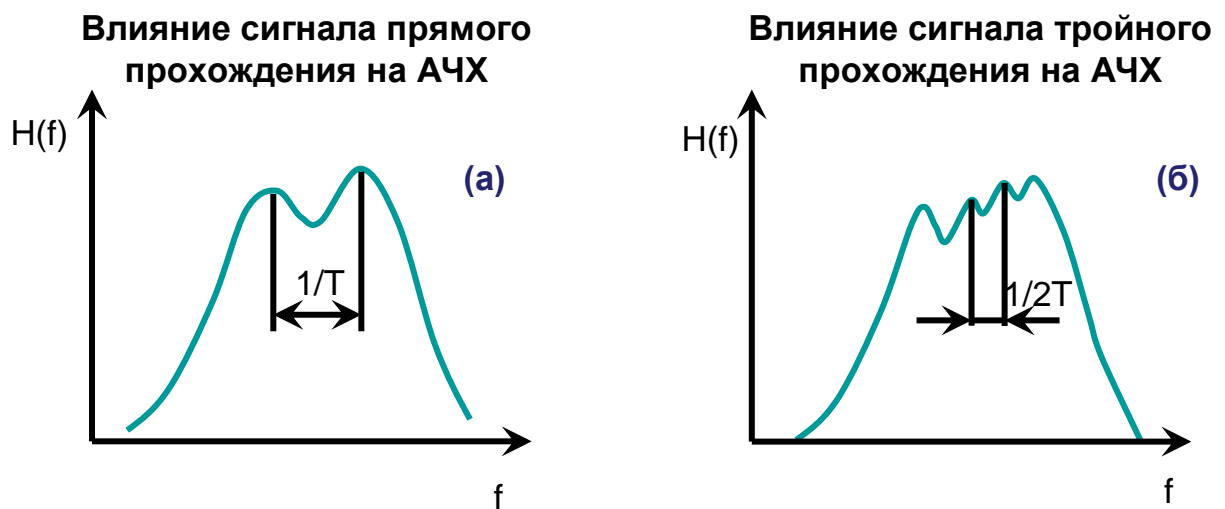
- Физическая природа возникновения сигнала тройного прохождения связана с двумя явлениями:
 - чисто механическим отражением ПАВ от акустических неоднородностей (в частности, электродов преобразователя)
 - регенерацией ПАВ выходным преобразователем.
- Уровень регенерированного сигнала определяется параметрами нагрузочной цепи, оптимизируемыми в процессе расчета ЛЗ.
- Для уменьшения сигнала тройного прохождения предложен, в частности, ряд конструктивных решений, основанных на фазовой компенсации.
- Наличие сигналов прямого и тройного прохождения ведет к изрезанности АЧХ (неравномерности затухания) в полосе пропускания.
- Сигнал прямого прохождения вызывает появление пульсаций в полосе пропускания отстоящих по частоте на величину $1/T$.

- Сигнал тройного прохождения вызывает изрезанность АЧХ в полосе пропускания, период которой $\Delta f'$ определяется задержкой между основным задержанным сигналом и сигналом тройного прохождения :

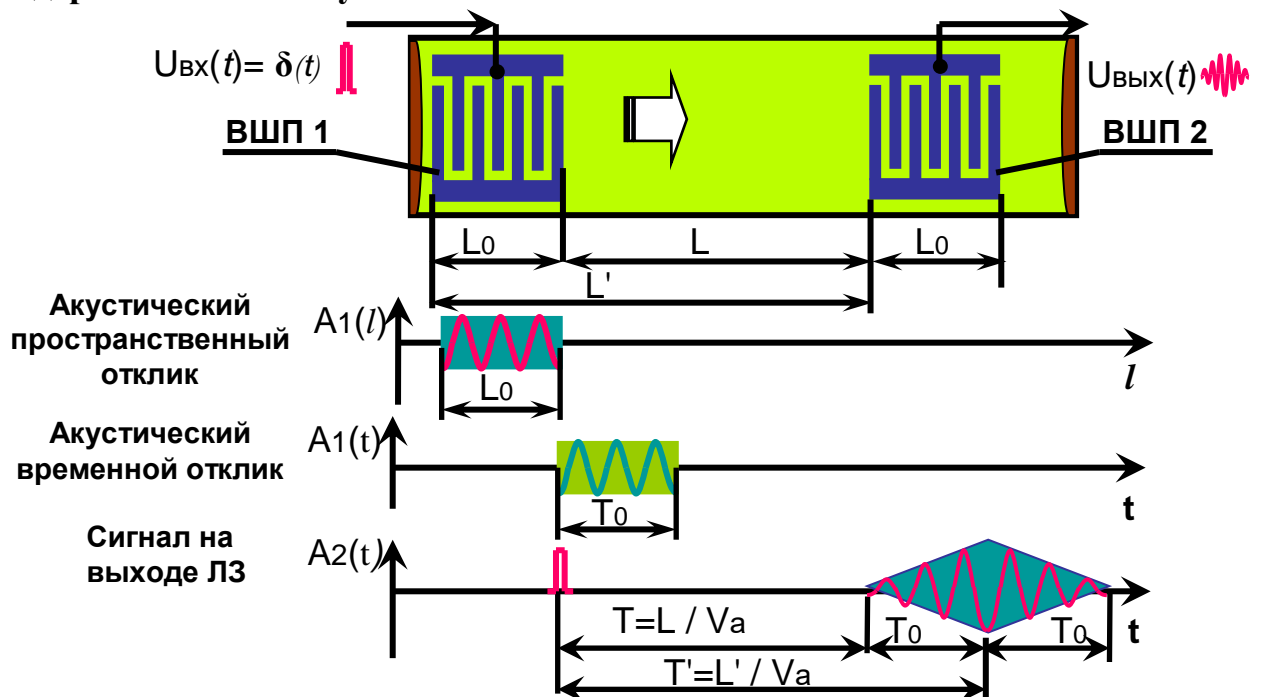
$$\Delta f' = 1/2T.$$

Искажения АЧХ

Искажения АЧХ, обусловленные сигналом прямого прохождения (а) и сигналом тройного прохождения (б)



Структурная схема линии задержки и импульсный отклик линии задержки на δ -импульс



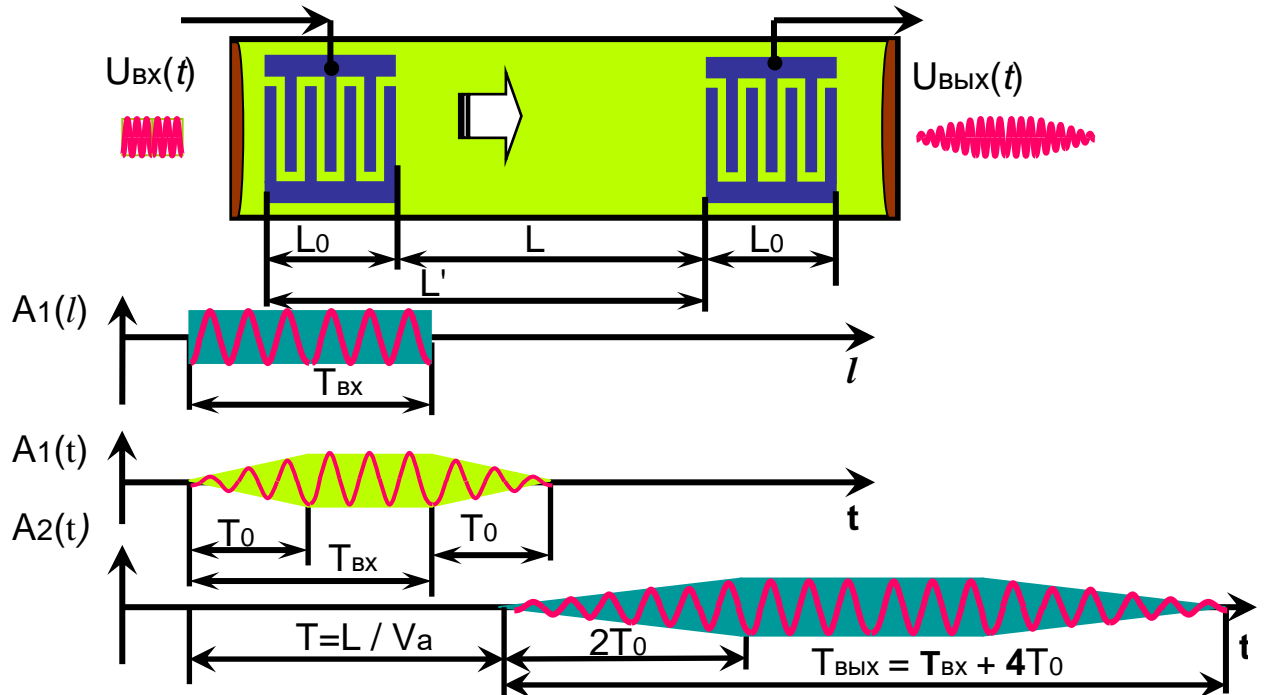
- Задержка выходного сигнала) по отношению ко времени прихода δ -импульса составляет

$$T = L/V_{\Pi},$$

где L — расстояние между близлежащими краями входного и выходного преобразователей.

- При измерении задержки до максимума выходного сигнала (T') в качестве расстояния между преобразователями следует считать величину L' , измеренную (в случае идентичных преобразователей 1, 2) между их одноименными краями.

Обобщённая структура и импульсные отклики линии задержки на радиоимпульс



- На точность воспроизведения задержки влияет ряд технологических и физических факторов:

- конечная точность технологического оборудования при изготовлении фотошаблона;
- ошибки при совмещении, экспонировании, в ориентации звукопровода при его изготовлении;
- ограниченная термостабильность скорости ПАВ.

Для увеличения пути прохождения ПАВ и соответственно времени задержки применяют МПО.

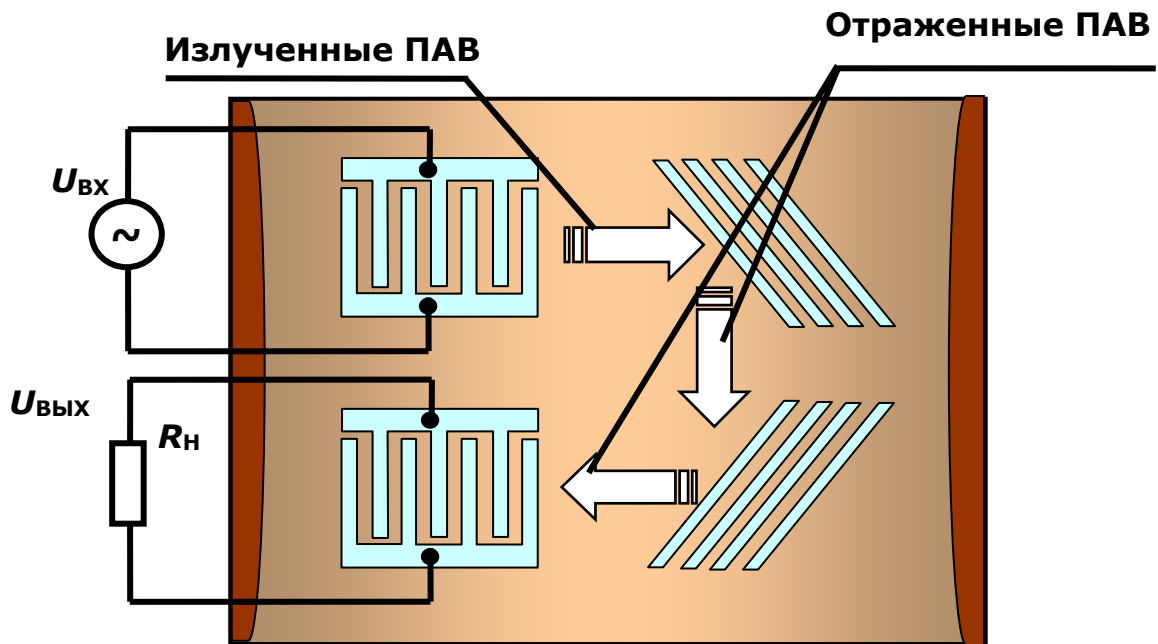


Рисунок Линия задержки с применением МПО

Многоотводные линии задержки на ПАВ

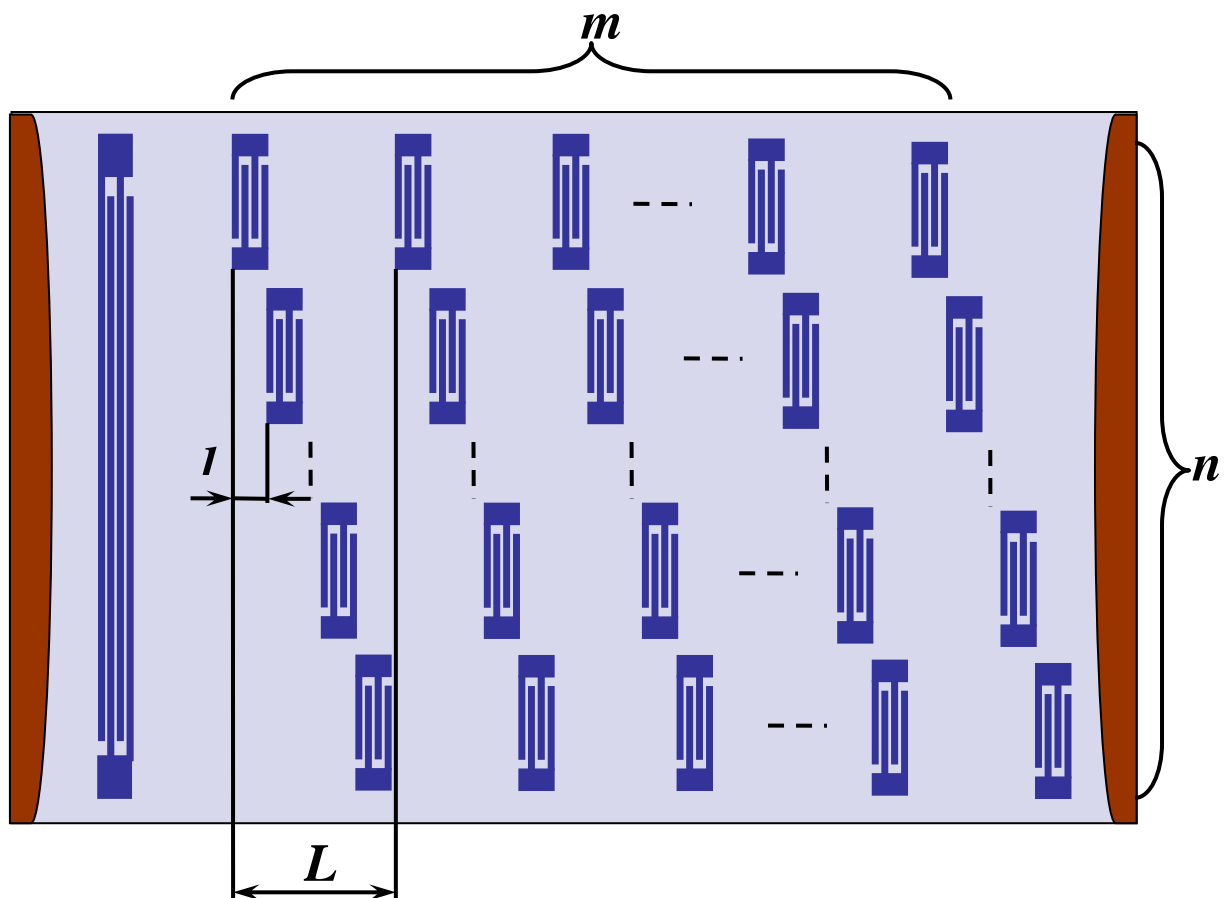
- При $T_m \leq 100 \div 150$ мкс чаще используется классическая конструкция с последовательным расположением преобразователей в прямолинейном акустическом потоке.
- Недостатки конструкции:
 - уменьшение величины задержанного сигнала по мере увеличения номера отвода (времени дискретной задержки)
 - наличие паразитных переотраженных сигналов.
- Уменьшение энергии поверхностной волны вызвано
 - переотражением ПАВ,
 - поглощением энергии в нагрузке каждого отвода,
 - дифракцией.
- Расстояние между входным и последним выходным преобразователем определяется
 - допустимыми дифракционными искажениями,
 - минимальной апертурой перекрытия электродов;
 - максимальная апертура определяется конечной шириной звукопровода.
- Число отводов (выходных ВШП) выбирается из допустимой величины уменьшения импульсного отклика на последнем отводе ΔA_n .
- Относительная полоса пропускания $\Delta f/f_0$ определяет число электродов двухфазного преобразователя.

- Значительно большее число отводов можно реализовать, используя матричную конструкцию МЛЗ.

- Выходные отводы располагаются по m в n независимых пространственных каналах.
- Шаг преобразователей в одном канале L .
- Расстояние между преобразователями в соседних каналах

$$l = L/n.$$

Многоотводная ЛЗ матричной конструкции



- Число отводов m в каждом канале определяется величиной коэффициента электромеханической связи k_2 звукопровода.

- Для пьезокварца $m = 10 \dots 50$,
- Для ниобата лития и германата висмута $m = 5 \dots 20$.

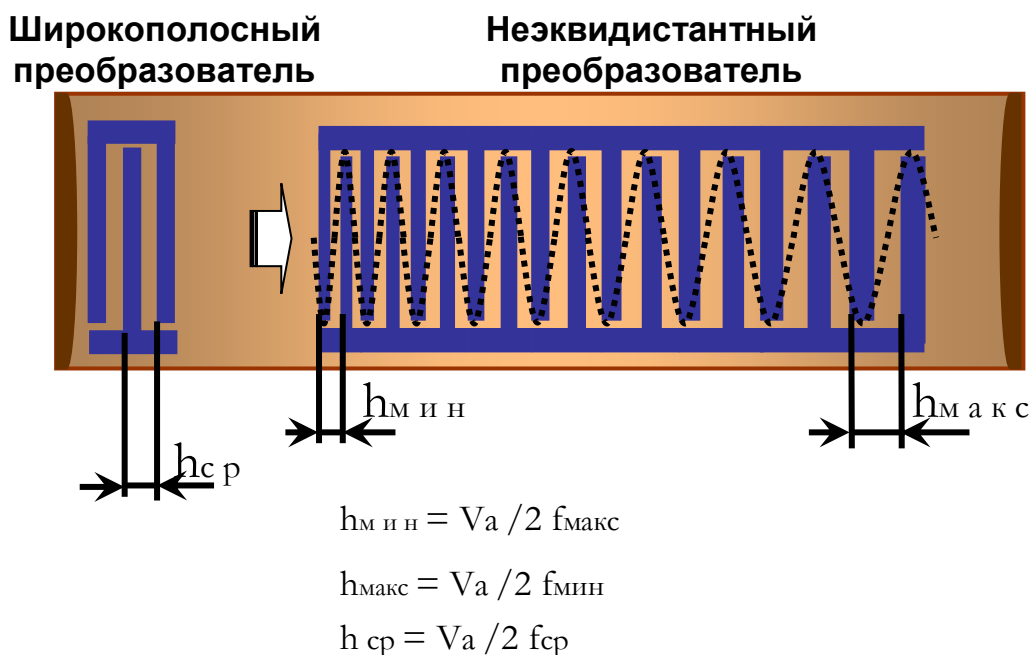
- Эта конструкция применяется в согласованных фильтрах с большим числом элементов сигнала (больше $20 \dots 50$).

ДИСПЕРСИОННЫЕ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ НА ПАВ

- На пьезоэлектрическом звукопроводе в общем акустическом потоке расположены неэквидистантный многоэлектродный преобразователь и широкополосный преобразователь.

Если к неаподизованному преобразователю приложить импульс малой длительности, то вдоль выходного преобразователя распространяется короткий волновой пакет (рис.14). В каждый момент времени частота выходного напряжения зависит от расстояния между электродами в месте расположения возбуждающего импульса. Частота заполнения зависит от времени. Если шаг электродов преобразователя изменяется от $h_{\text{мин}}$ на одном конце до $h_{\text{макс}}$ на другом, то частота изменяется от $f_{\text{макс}}$ до $f_{\text{мин}}$. Длительность T выходного импульса соответствует длине преобразователя $T = L/V_{\text{п}}$.

ДЛЗ с топологической дисперсией несимметричной конструкции

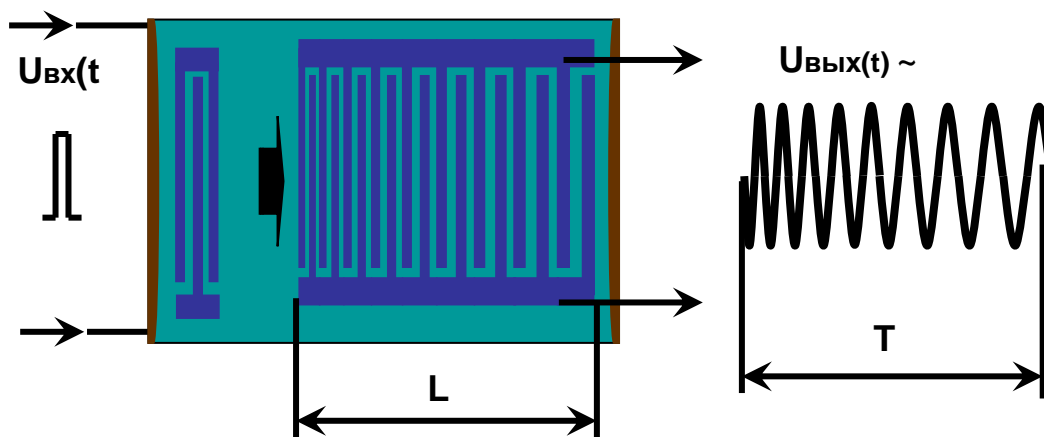


- Если к неаподизованному преобразователю приложить импульс малой длительности, то вдоль выходного преобразователя распространяется короткий волновой пакет.
- В каждый момент времени частота выходного напряжения зависит от расстояния между электродами в месте расположения возбуждающего импульса.
- Частота заполнения зависит от времени.

Дисперсионный фильтр на встречно – штыревых преобразователях

Топология фильтра на ВШП

Импульсная характеристика дисперсионного фильтра



- Если шаг электродов преобразователя изменяется от h_{\min} на одном конце до h_{\max} на другом, то частота изменяется от f_{\max} до f_{\min} .
- Длительность T выходного импульса соответствует длине преобразователя

$$T = L/V_{\text{п.}}$$

- Импульс такого типа называют сигналом с внутри импульсной частотной модуляцией (ЧИМ).
- Устройство на ПАВ называют – *дисперсионной линией задержки (ДЛЗ)* или *дисперсионным фильтром*.
- В дисперсионных линиях задержки групповое время задержки зависит от частоты сигнала.
- На частотах f_{\min} и f_{\max} групповое время задержки различается на T .

Шаг электродов неэквидистантного преобразователя меняется от

$$h_{\max} = V_{\text{п.}} / 2f_{\min} \text{ до } h_{\min} = V_{\text{п.}} / 2f_{\max},$$

где f_{\min} и f_{\max} — нижняя и верхняя частоты диапазона девиации ДЛЗ.

Наибольшее распространение получили ДЛЗ, имеющие линейную дисперсионную характеристику):

$$t(f) = -(f-f_0)\gamma + T_0;$$

и квадратичную фазовую характеристику:

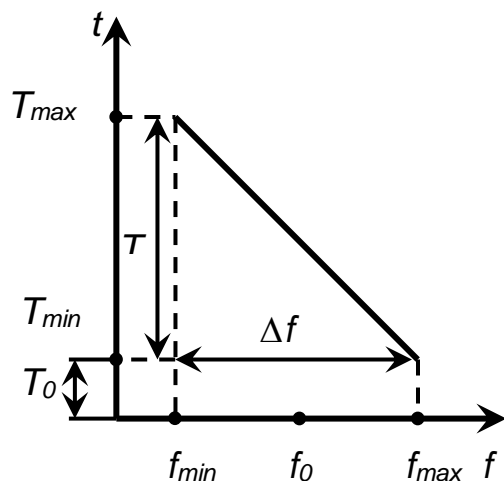
$$\varphi(f) = \pi(f-f_0)^2/\gamma + 2\pi f T_0 + \varphi_0,$$

где $f_0 = (f_{\max} + f_{\min})/2$;

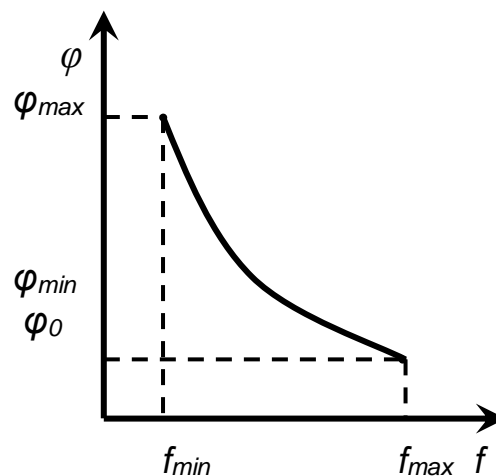
$\gamma = (f_{max} - f_{min})/T = \Delta f/T$ — крутизна дисперсионной характеристики; T - начальная задержка; φ_0 - начальная фаза.

Характеристики ДЛЗ

Дисперсионная характеристика ДЛЗ



Фазовая характеристика ДЛЗ



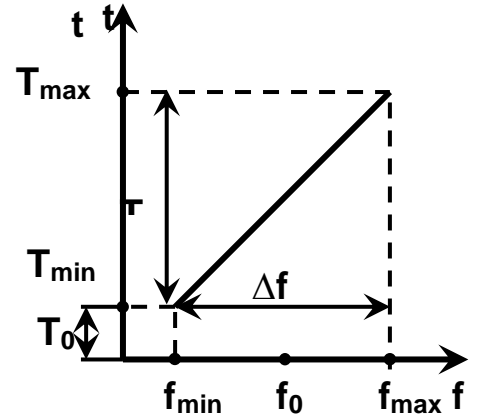
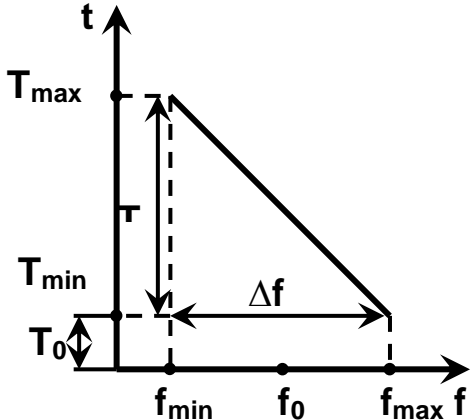
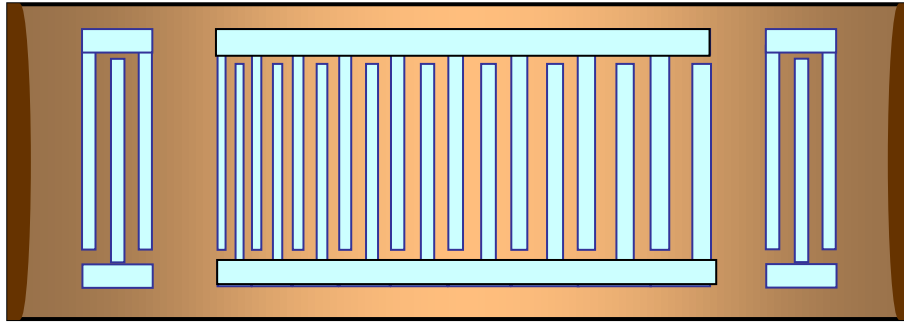
- Шаг электродов широкополосного преобразователя

$$h_{cp} = (h_{min} + h_{max})/2.$$

- Число электродов широкополосного преобразователя выбирается исходя из обеспечения минимальных искажений спектра сигнала или АЧХ неэквидистантного преобразователя, т. е. $\Delta f_{ш} > \Delta f$.

- Это обуславливает относительно высокие вносимые потери ДЛЗ несимметричной конструкции.

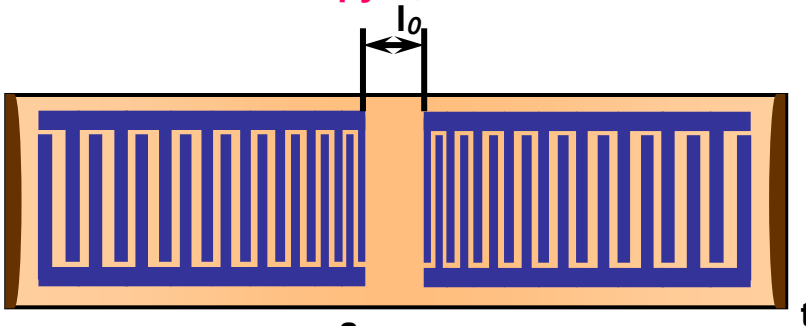
ДЛЗ с изменяемым наклоном дисперсионной характеристики



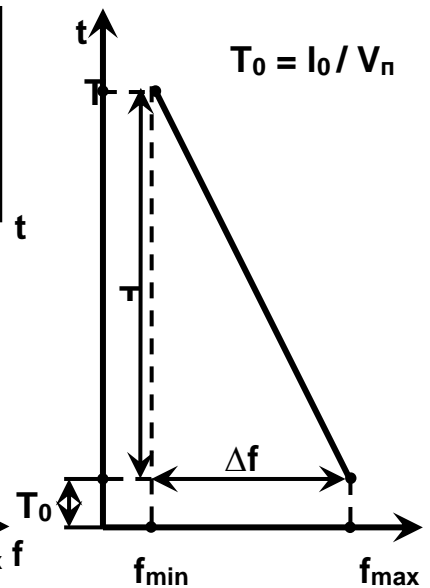
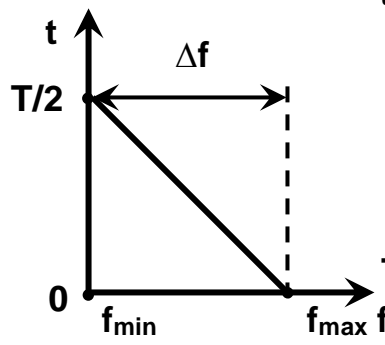
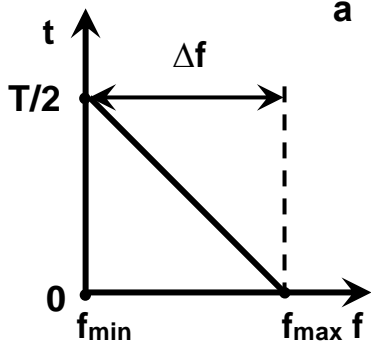
- С энергетической точки зрения предпочтительнее ДЛЗ симметричной конструкции.
- Неэквидистантные преобразователи сориентированы друг к другу частями с одинаковым шагом электродов.

ДЛЗ симметричной конструкции

ДЛЗ симметричной конструкции



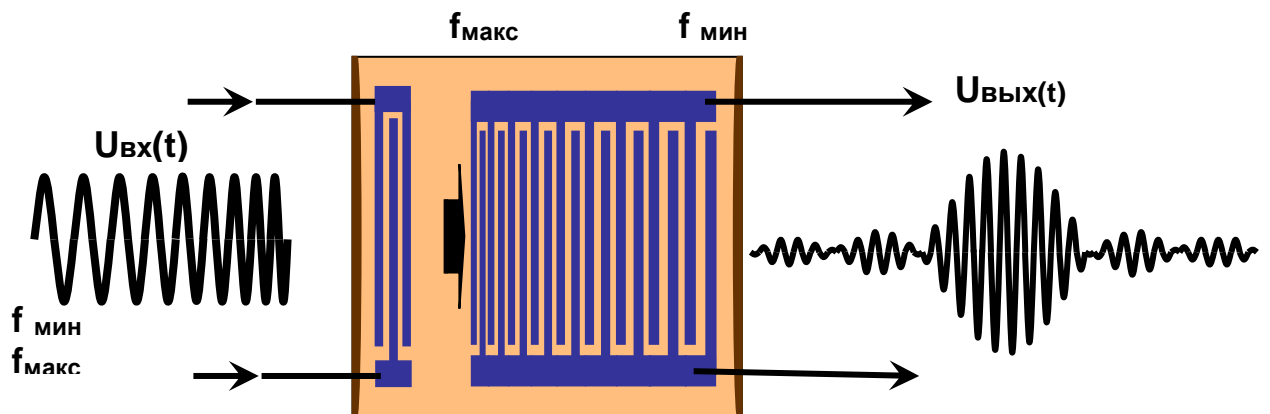
Результирующая дисперсионная характеристика



- Парциальные дисперсионные характеристики этих преобразователей имеют
- полную девиацию $\Delta f = f_{\max} + f_{\min}$

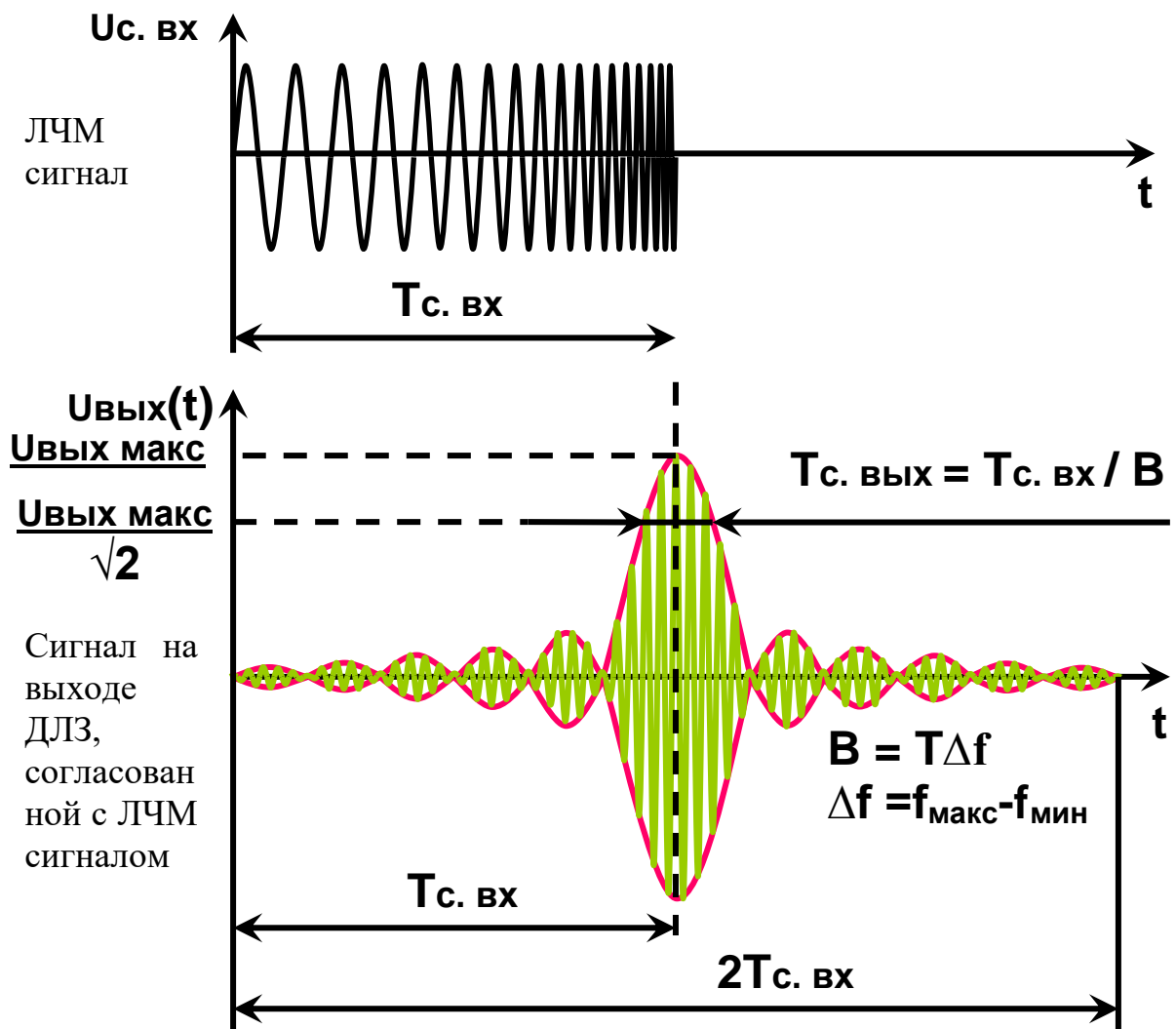
- и половинную задержку ($T/2$) по отношению к результирующей дисперсионной характеристике.
 - Дисперсионные фильтры применяются в радиолокации для *сжатия импульсов*.
 - На фильтр поступает сигнал с внутриимпульсной ЧМ.
 - Импульсная характеристика фильтра аналогична сигналу, но инвертирована во времени, так что мгновенная частота изменяется от $f_{\text{мин}}$ до $f_{\text{макс}}$.

Отклик согласованного дисперсионного фильтра на ЛЧМ сигнал



- В определенный момент времени положение минимумов и максимумов акустической волны точно совпадает с положениями электродов неэквидистантного преобразователя.
- Все парциальные составляющие акустической волны складываются синфазно, и сигнал на выходе имеет максимальную амплитуду.

ЛЧМ сигнал на входе (а) и сигнал на выходе согласованной ДЛЗ (б)



- Длительность выходного импульса по уровню 0,707 (-3дБ) примерно равна

$$T_{\text{вых}} = 1 / \Delta f,$$

где $\Delta f = f_{\text{макс}} - f_{\text{мин}}$ – ширина спектра сигнала.

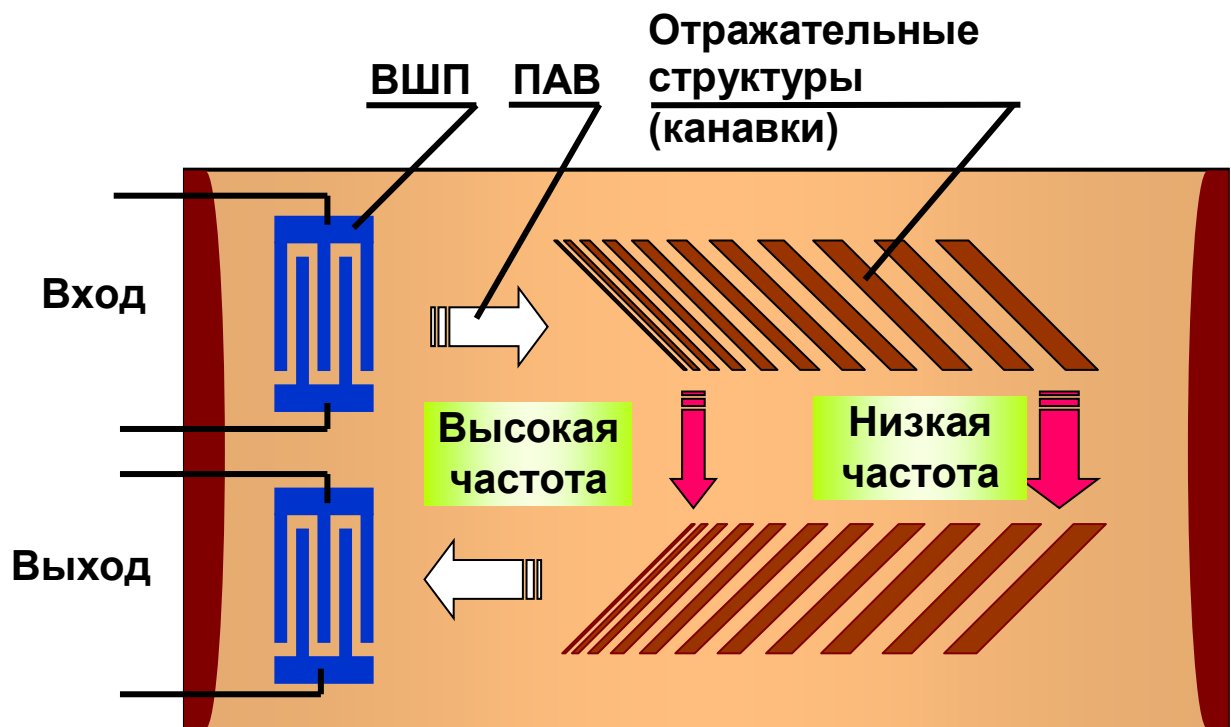
- Отношение длительностей входного и выходного сигналов называется коэффициентом сжатия B .

$$B = T_{\text{с.вх}} / T_{\text{с.вых}} = T\Delta f.$$

- Обычно $B = 50 \dots 500$.

ДЛЗ на отражательных решетках

Дисперсионный фильтр на отражательных решетках (рис.21) позволяет получить значительно больший коэффициент сжатия B



Преобразование электрической энергии в акустическую энергию и обратно осуществляется соответственно входным и выходным преобразователями.

Две наклонные отражательные решетки задают дисперсионные свойства. Они состоят из мелких канавок, периодичность которых возрастает или убывает в зависимости от расстояния до ВШП. Решетки расположены так, чтобы отражение ПАВ происходило под углом 90° .

Акустические волны возбуждаются входным эквидистантным ВШП, затем дважды отражаются от решеток и достигают выходного ВШП. Эффективное отражение ПАВ происходит от канавок шаг следования, которых соответствует длине поверхностной волны. Шаг изменяется вдоль длины решетки. Волны различных частот отражаются от различных мест и имеют разные длины акустических путей. Время задержки зависит от частоты.

ДЛЗ такой конструкции позволяют получить коэффициенты сжатия, достигающие до 10^4 .