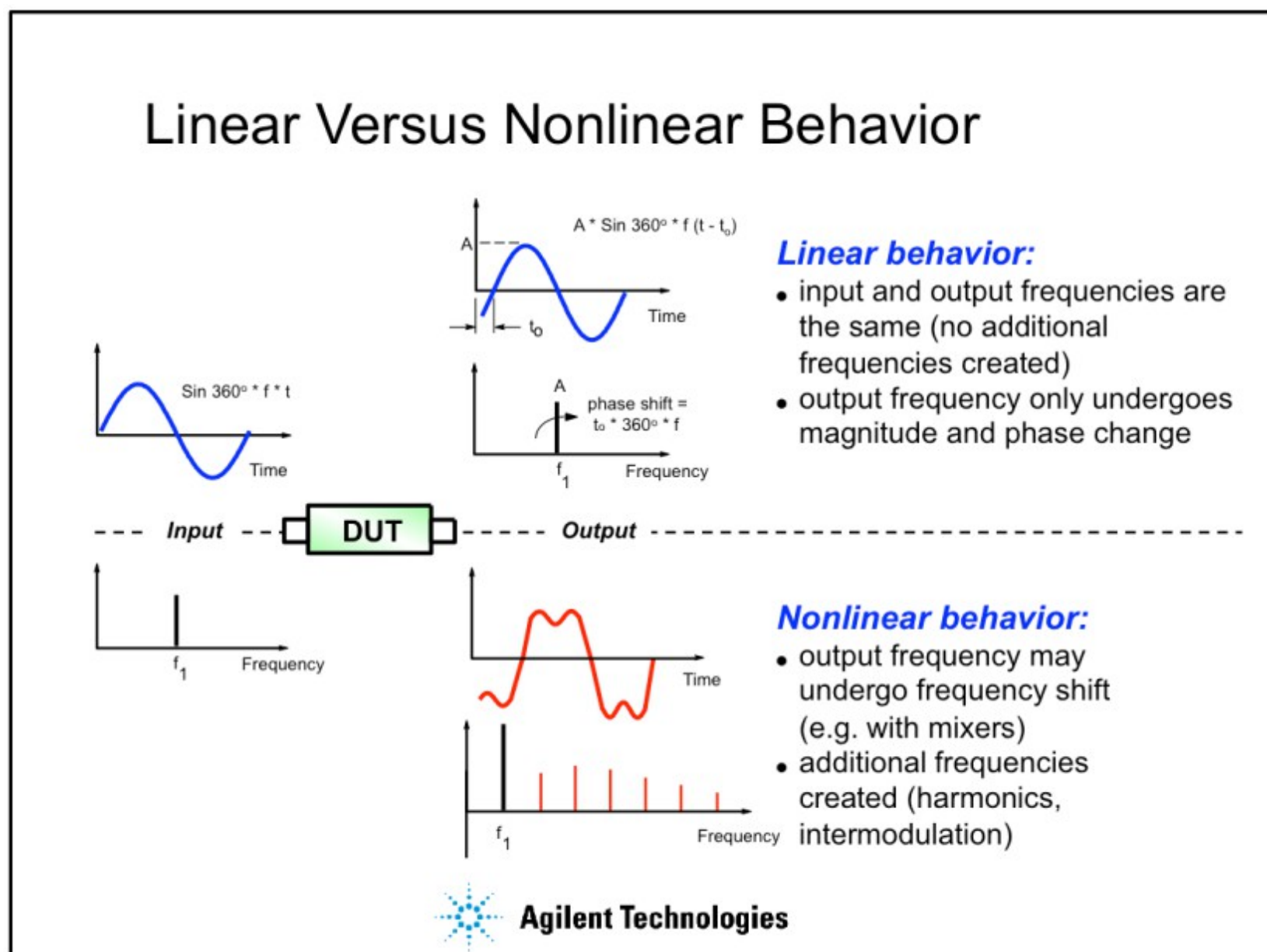


Linear Versus Nonlinear Behavior

Линейное и нелинейное поведение



Slide 19

Linear behavior:

- input and output frequencies are the same (no additional frequencies created)
- output frequency (*signal*) only undergoes magnitude and phase change

Nonlinear behavior:

- output frequency (*signal*) may undergo frequency shift (e.g. with mixers)
- additional frequencies created (harmonics, intermodulation)

Линейное поведение:

- входной и выходной сигналы одинаковы (дополнительные гармоники не создаются).
- выходной сигнал изменяется только по величине и фазе (**Примечание.** обусловлено наличием в тестируемом устройстве реактивных элементов) - справедливо для гармонических сигналов в установившемся режиме. Если имеют место переходные процессы, то до их окончания сигнал является квазигармоническим и возникают дополнительные гармонические составляющие. Отсюда и пляски с акустическими кабелями у которых большой разброс RLC-параметров.

Нелинейное поведение:

- выходной сигнал может подвергаться частотному сдвигу (например, при микшировании)
- создаются дополнительные частоты (гармоники, интермодуляция) (**Примечание.** Обусловлено наличием в тестируемом устройстве элементов с нелинейными характеристиками).

Before we explore linear signal distortion, let's review the differences between linear and nonlinear behavior. Devices that behave linearly only impose magnitude and phase changes on input signals. Any sinusoid appearing at the input will also appear at the output at the same frequency. No new signals are created. When a single sinusoid is passed through a linear network, we don't consider amplitude and phase changes as distortion. **However, when a complex, time-varying signal is passed through a linear network, the amplitude and phase shifts can dramatically distort the time-domain waveform. (which is unacceptable for audio frequency amplifiers)**

Non-linear devices can shift input signals in frequency (a mixer for example) and/or create new signals in the form of harmonics or intermodulation products. Many components that behave linearly under most signal conditions can exhibit nonlinear behavior if driven with a large enough input signal. This is true for both passive devices like filters and even connectors, and active devices like amplifiers

Прежде чем мы исследуем линейное искажение сигнала, давайте рассмотрим различия между линейным и нелинейным поведением. Устройства, которые ведут себя линейно, накладывают только изменения амплитуды и фазы на входные сигналы. Любая синусоида, появляющаяся на входе, появится и на выходе с той же частотой. Новые сигналы не создаются. Когда одиночная синусоида проходит через линейную сеть, мы не рассматриваем изменения амплитуды и фазы как искажение. **Однако, когда сложный, изменяющийся во**

времени сигнал проходит через линейную сеть, сдвиги амплитуды и фазы могут сильно исказить форму сигнала во временной области. (что нежелательно для усилителей звуковой частоты)

Нелинейные устройства могут сдвигать входные сигналы по частоте (например, смеситель) и/или создавать новые сигналы в виде гармоник или продуктов интермодуляции. Многие компоненты, которые ведут себя линейно при большинстве условий сигнала, могут демонстрировать нелинейное поведение, если на них подается достаточно большой входной сигнал. **Это верно как для пассивных устройств, таких как фильтры и даже разъемы, так и для активных устройств, таких как усилители.**

Примечание. DUT - Device Under Test (тестируемый компонент/элемент)

Небольшое пояснение.

Гармонический сигнал описывается следующей формулой:

$$A \cos (\omega_0 t + \varphi_0)$$

где

A – амплитуда сигнала,

$\omega_0 = 2\pi f_0$ – круговая частота,

φ_0 – начальная фаза.

При этом A — величина постоянная, а спектр сигнала состоит из одной единственной составляющей с частотой ω_0 — монохроматический спектр.

Во время переходных процессов сигнал становится квазигармоническим [1]:

$$s(t) = A(t) \cos [\omega_0 t + \varphi(t)]$$

В отличие от установившегося режима амплитуда сигнала A и начальная фаза φ зависят от времени на участке переходного процесса. При этом амплитуда сигнала A не постоянна (как при гармоническом сигнале), а спектр сигнала становится сложным (с дополнительными гармоническими составляющими) зависящим от поведения функции $A(t)$. Наибольшим искажениям (в том числе и искажениям поворота (SID) из-за конечного времени прохождения сигнала) подвержен первый период бурста. В ряде случаев подобные искажения видны невооруженным глазом. По мере затухания переходных процессов (теоретически их продолжительность равна бесконечности) искажения уменьшаются. Однако уже со второго периода невооруженным глазом они практически не видны, а искажения SID и вовсе отсутствуют благодаря отсутствию поворотов сигнала.

Применительно к усилителям звуковой частоты в более выгодном положении находятся усилители постоянного тока (УПТ).

Причиной дополнительных переходных процессов (кроме разделительных конденсаторов на входе и в цепи ОС) часто являются индуктивности включаемые на выходе усилителя предназначенные для обеспечения устойчивой работы. Эти индуктивности образуют последовательный колебательный контур с реактивной нагрузкой в виде емкости достигающей в ряде случаев 8 мкФ (например, электростаты). Поэтому целесообразно по возможности разрабатывать усилители не нуждающиеся в стабилизации их работы с помощью индуктивности.

Пару слов о времени прохождения сигнала (time Propagation Delay). В усилителях постоянного тока групповое время задержки (ГВЗ) сигнала имеет горизонтальный участок от инфранизких частот (по сути от постоянного тока DC) и перекрывает весь звуковой диапазон. Очень важно чтобы этот участок был не менее чем до 300 кГц. Далее ГВЗ должно иметь плавный спад до нуля, допустим небольшой подъем ГВЗ с низкой добротностью. Значительные подъемы ГВЗ способствуют росту SID искажений (искажения возникающие в моменты изменения частоты или амплитуды сигнала). Наиболее просто их измерить компенсационным методом с помощью тестовых сигналов частотой 10 кГц (синусоидальных или треугольных бурстов).

На горизонтальных участках ГВЗ его значение совпадает по величине со значением t_{PD} .

Величину векторных погрешностей в пределах звукового диапазона (a) для синусоидального сигнала вычисляют по формуле [2]:

$$a \approx 2\pi A \cdot t_{PD} / T$$

где

T – период сигнала, мкс;

A – амплитуда сигнала на выходе усилителя, В

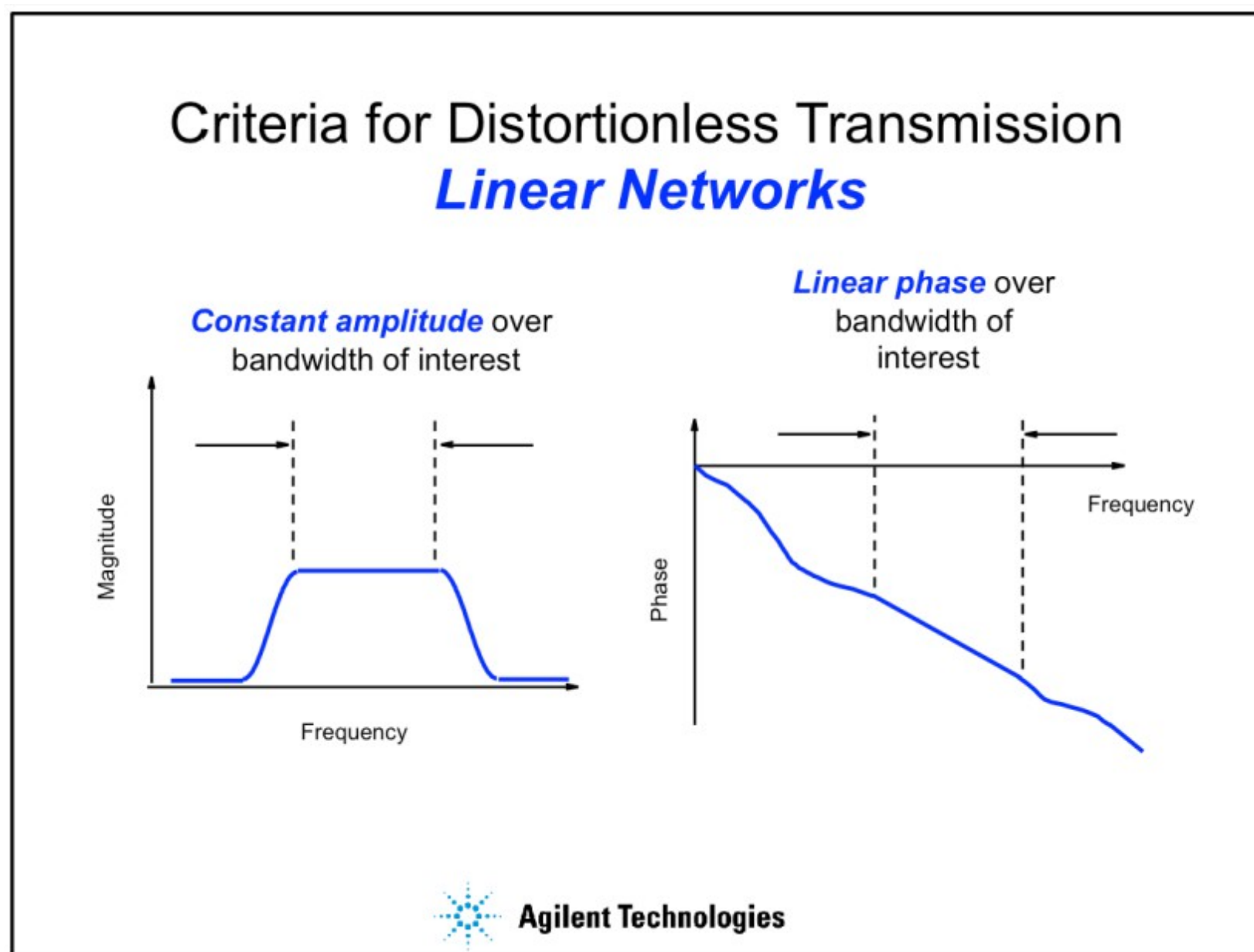
t_{PD} – время задержки прохождения сигнала, мкс

Критерием выполнения теста SWDT (Д.Хафлера) является векторная погрешность не более -60 дБ (0,1%) на частоте 10 кГц, и не более -70 дБ (0,01%) на средних частотах звукового диапазона [3]. Этому требованию для частоты 10 кГц соответствует $t_{PD} = T/1000 \cdot 2\pi = 100000/6280 = 16$ нс, а для частоты 20 кГц — 8 нс.

Однако как показывает практика в ряде случаев можно получить вполне хорошие результаты по качеству звука при t_{PD} не более 100...120 нс ((например, MIMESIS 9.2. Group Delay = 100 nS, constanta from DC to 300 kHz) и отсутствии необходимости применения индуктивности на выходе усилителя.

Литература:

1. Л.М.Финк, Сигналы, помехи, ошибки... , М, Радио и связь, 1984
2. Operational Amplifiers by Jiri Dostal_1993
3. D.A. Hafler, Listening Test for Amplifier Distortion, Hi-Fi News and Review, November 1986, pp.25-29



Slide 20

Criteria for Distortionless Transmission Linear Networks

Constant amplitude over bandwidth of interest
Linear phase over bandwidth of interest

Критерии передачи без искажений Линейные сети

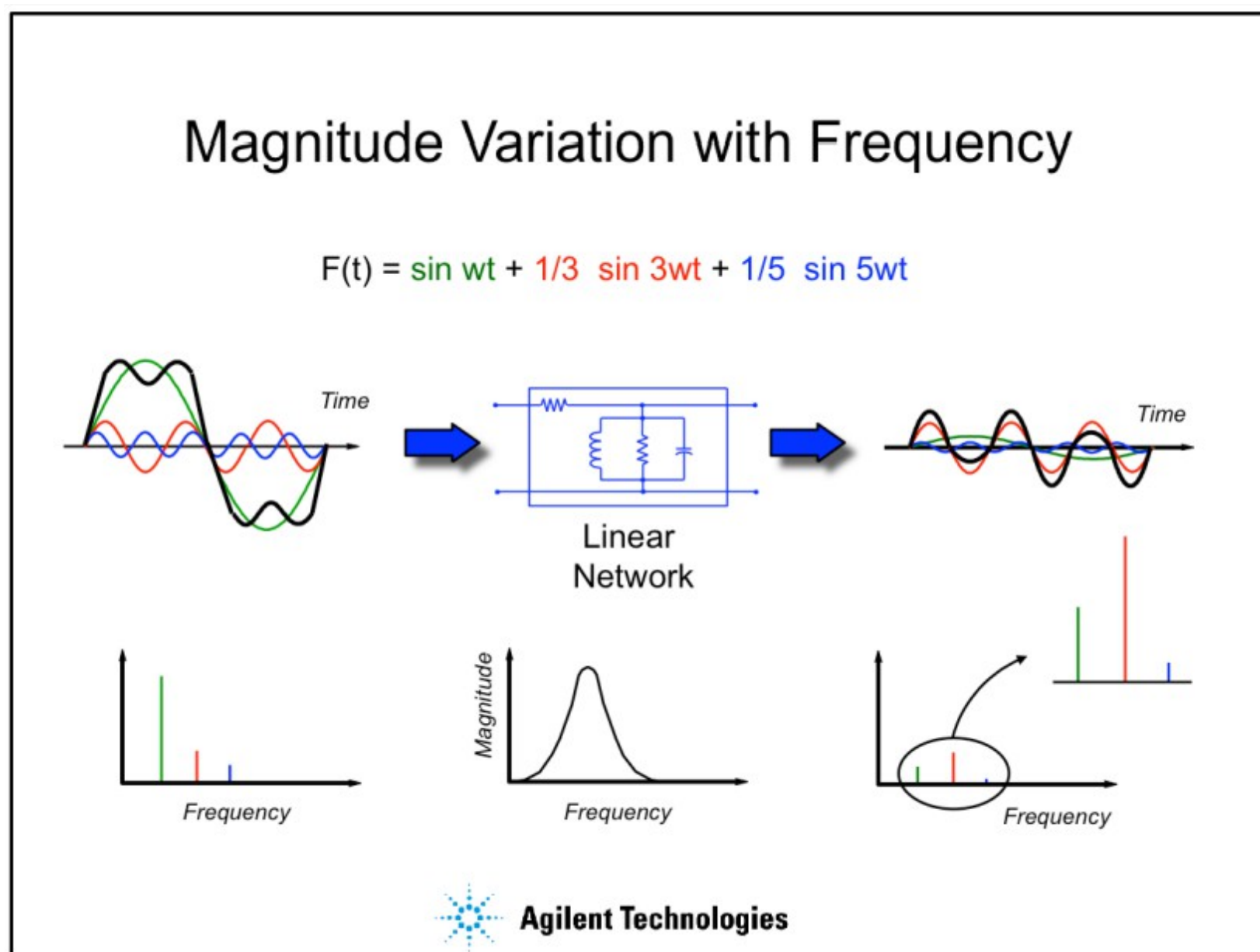
Постоянная амплитуда в интересующей полосе пропускания
Линейная фаза по интересующей полосе пропускания

Now let's examine how linear networks can cause signal distortion. There are three criteria that must be satisfied for linear distortionless transmission. First, the amplitude (magnitude) response of the device or system must be flat over the bandwidth of interest. This means all frequencies within the bandwidth will be attenuated identically. Second, the phase response must be linear over the bandwidth of interest. And last, the device must exhibit a "minimum-phase response", which means that at 0 Hz (DC), there is 0° phase shift ($0^\circ \pm n \cdot 180^\circ$ is okay if we don't mind an inverted signal). How can magnitude and phase distortion occur? The following two examples will illustrate how both magnitude and phase responses can introduce linear signal distortion.

Note. the phase must be either 0° or 180° for the inverted option. Taking into account psychoacoustics, the linear section of the phase should be from DC to 300 kHz (taking into account the correct transmission of 18 harmonics)

Теперь давайте рассмотрим, как линейные сети могут вызвать искажение сигнала. Есть три критерия, которые должны быть удовлетворены для линейной передачи без искажений. Во-первых, амплитуда (величина) отклика устройства или системы должна быть плоской в интересующей полосе пропускания. Это означает, что все частоты в пределах полосы пропускания будут ослабляться одинаково. Во-вторых, фазовая характеристика должна быть линейной в интересующей полосе пропускания. И, наконец, устройство должно демонстрировать «минимальную фазовую характеристику», что означает, что при 0 Гц (постоянный ток) фазовый сдвиг равен 0° ($0^\circ \pm n \cdot 180^\circ$ — это нормально, если мы не возражаем против инвертированного сигнала). Как могут возникнуть амплитудные и фазовые искажения? Следующие два примера иллюстрируют, как амплитудная и фазовая характеристики могут вносить линейные искажения сигнала.

Примечание. фаза должна быть либо 0° либо 180° для инвертирующего варианта. С учетом



Slide 21

Magnitude Variation with Frequency

Изменение амплитуды с частотой

Here is an example of a square wave (consisting of three sinusoids) applied to a bandpass filter. The filter imposes a non-uniform amplitude change to each frequency component. Even though no phase changes are introduced, the frequency components no longer sum to a square wave at the output. The square wave is now severely distorted, having become more sinusoidal in nature.

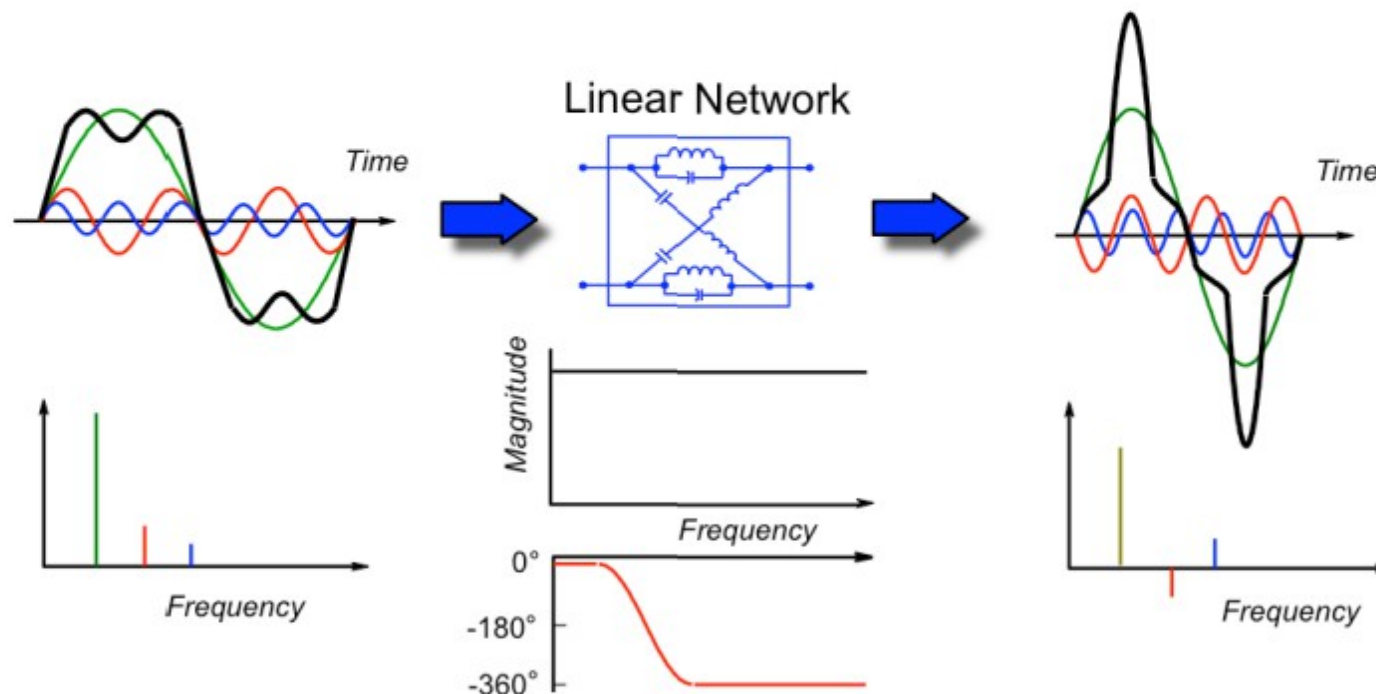
Note. The parallel circuit is tuned to the 3rd harmonic, while the 1st and 5th harmonics are attenuated.

Вот пример прямоугольной волны (состоящей из трех первых гармоник), примененной к полосовому фильтру. Фильтр налагает неравномерное изменение амплитуды на каждую частотную составляющую. Несмотря на то, что изменения фазы не вводятся, частотные составляющие больше не складываются в прямоугольную волну на выходе. Прямоугольная волна теперь сильно искажена, став более синусоидальной по своей природе.

Примечание. Параллельный контур настроен на 3-ю гармонику, при этом 1-я и 5-я гармоника ослабляются.

Phase Variation with Frequency

$$F(t) = \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t$$



Slide 22

Phase Variation with Frequency

Изменение фазы в зависимости от частоты

Let's apply the same square wave to another filter. Here, the third harmonic undergoes a 180° phase shift, but the other components are not phase shifted. All the amplitudes of the three spectral components remain the same (filters which only affect the phase of signals are called allpass filters). The output is again distorted, appearing very impulsive this time.

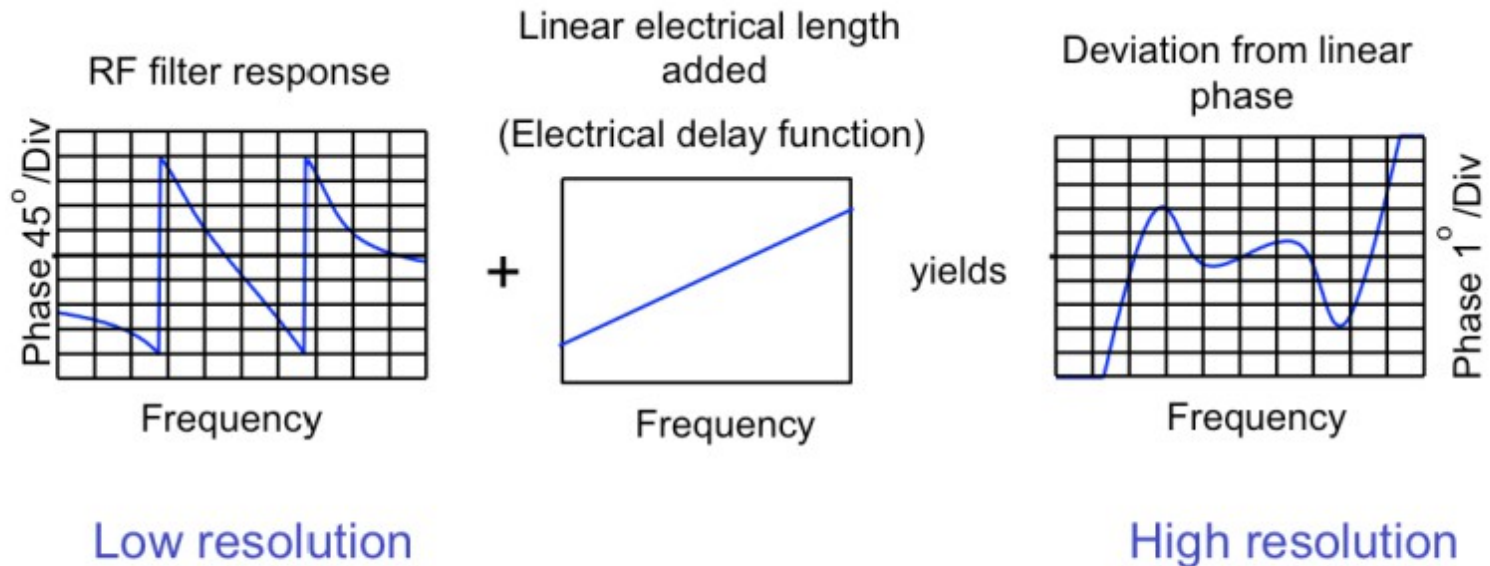
Note. As you can see from the above example, the signal spectrum remained the same (the amplitude of the harmonics did not change), only the phase of one harmonic changed by 180 degrees.

Давайте применим ту же прямоугольную волну к другому фильтру. Здесь третья гармоника претерпевает фазовый сдвиг на 180° , но остальные компоненты не сдвинуты по фазе. Все амплитуды трех спектральных составляющих остаются неизменными (фильтры, влияющие только на фазу сигналов, называются фильтрами полного пропускания – всепропускающие фильтры). Выход снова искажен, на этот раз очень импульсивно.

Примечание. Как видим из приведенного примера спектр сигнала остался прежним (амплитуда гармоник не изменилась), изменилась только фаза одной гармоники на 180 градусов.

Deviation from Linear Phase

*Use electrical delay to
remove linear portion of
phase response*



Slide 23

Deviation from Linear Phase

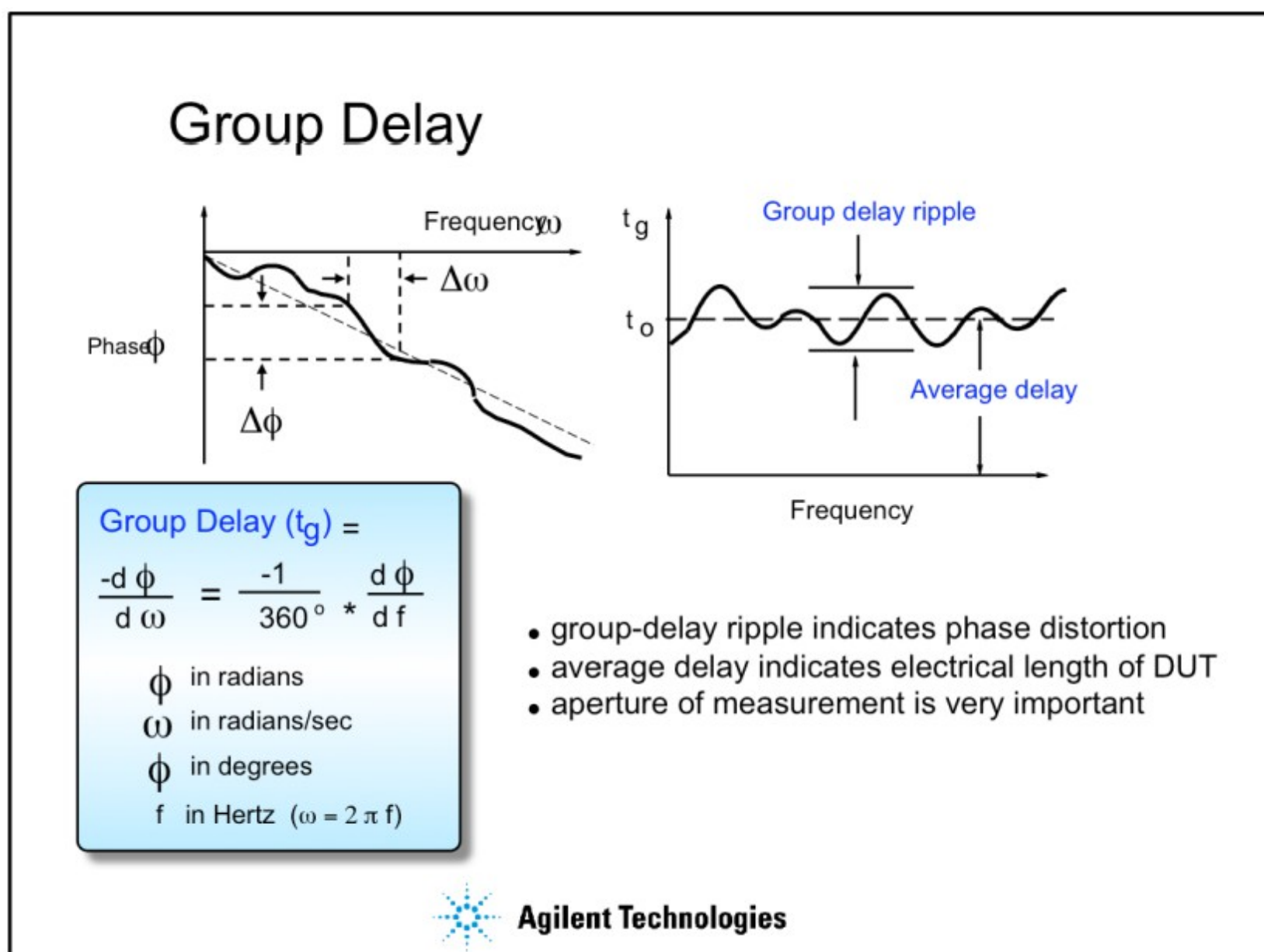
Use electrical delay to remove linear portion of phase response

Отклонение от линейной фазы

Используйте электрическую задержку, чтобы удалить линейную часть фазовой характеристики

Now that we know insertion phase versus frequency is a very important characteristic of a component, let's see how we would measure it. Looking at insertion phase directly is usually not very useful. This is because the phase has a negative slope with respect to frequency due to the electrical length of the device (the longer the device, the greater the slope). Since it is only the deviation from linear phase which causes distortion, it is desirable to remove the linear portion of the phase response. This can be accomplished by using the electrical delay feature of the network analyzer to cancel the electrical length (time Propagation Delay) of the DUT. This results in a high-resolution display of phase distortion (deviation from linear phase).

Теперь, когда мы знаем, что фаза включения в зависимости от частоты является очень важной характеристикой компонента, давайте посмотрим, как мы будем ее измерять. Глядя непосредственно на фазу вставки, обычно не очень полезно. Это связано с тем, что фаза имеет отрицательный наклон по отношению к частоте из-за электрической длины устройства (чем длиннее устройство, тем больше наклон). Поскольку искажение вызывает только отклонение от линейной фазы, желательно удалить линейную часть фазовой характеристики. Этого можно добиться, используя функцию электрической задержки анализатора цепей, чтобы компенсировать электрическую длину (time Propagation Delay) тестируемого устройства. Это приводит к отображению фазового искажения (отклонения от линейной фазы) с высоким разрешением.



Slide 24

Group Delay

- group-delay ripple indicates phase distortion
- average delay indicates electrical length of DUT
- aperture of measurement is very important
- пульсации групповой задержки указывают на фазовые искажения
- средняя задержка указывает на электрическую длину тестируемого устройства
- апертура (диапазон частот) измерения очень важна

Another useful measure of phase distortion is group delay. Group delay is a measure of the transit time of a signal through the device under test, versus frequency. (Note: On horizontal sections, it is the same as the delay time of the signal at the test frequency). Group delay is calculated by differentiating the insertion-phase response of the DUT versus frequency. Another way to say this is that group delay is a measure of the slope of the transmission phase response. The linear portion of the phase response is converted to a constant value (representing the average signal-transit time) and deviations from linear phase are transformed into deviations from constant group delay. The variations in group delay cause signal distortion, just as deviations from linear phase cause distortion. Group delay is just another way to look at linear phase distortion.

Другой полезной мерой фазовых искажений является **групповая задержка**. Групповая задержка — это мера времени прохождения сигнала через тестируемое устройство в зависимости от частоты. (Примечание. На горизонтальных участках совпадает с временем задержки прохождения сигнала на частоте тестирования). Групповая задержка рассчитывается путем дифференцирования отклика тестируемого устройства на фазу включения в зависимости от частоты. Другими словами, групповая задержка является мерой наклона фазовой характеристики передачи. **Линейная часть фазовой характеристики преобразуется в постоянное значение (представляющее среднее время прохождения сигнала), а отклонения от линейной фазы преобразуются в отклонения от постоянной групповой задержки. Изменения в групповой задержке вызывают искажение сигнала, точно так же, как отклонения от линейной фазы вызывают искажение.** Групповая задержка — это еще один способ взглянуть на линейные фазовые искажения.

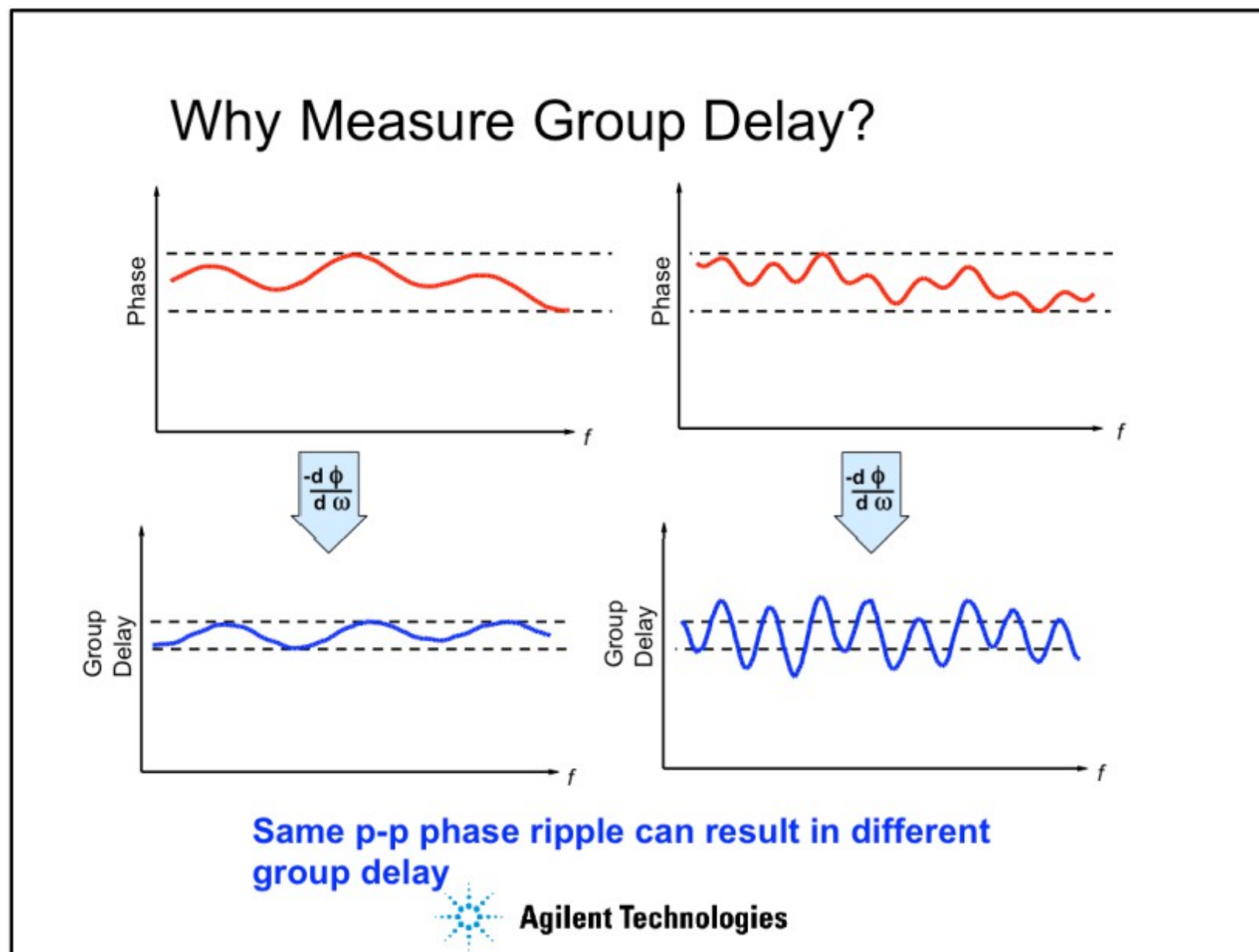
When specifying or measuring group delay, it is important to quantify the aperture in which the measurement is made. The aperture is defined as the frequency delta used in the differentiation process (the denominator in the group-delay formula). As we widen the aperture, trace noise is reduced but less group-delay resolution is available (we are essentially averaging the phase response over a wider window). As we make the aperture more narrow, trace noise increases but we have more measurement resolution.

При указании или измерении групповой задержки важно количественно определить апертуру, в которой производится измерение. Апертура определяется как дельта частоты (Δf), используемая в процессе

дифференцирования (знаменатель в формуле групповой задержки).

$$\tau_{\text{гр}} \approx - \frac{1}{360^\circ} \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta f}$$

Когда мы расширяем апертуру, шум трассы уменьшается, но доступно меньшее разрешение групповой задержки (по сути, мы усредняем фазовую характеристику по более широкому окну). По мере того, как мы делаем апертуру более узкой, шум трассы увеличивается, но мы получаем большее разрешение измерений.



Slide 25

Why Measure Group Delay?

Same p-p phase ripple can result in different group delay

Зачем измерять групповую задержку?

Одна и та же пульсация фазы размаха может привести к различной групповой задержке

Why are both deviation from linear phase and group delay commonly measured? Depending on the device, both may be important. Specifying a maximum peak-to-peak value of phase ripple is not sufficient to completely characterize a device since the slope of the phase ripple is dependent on the number of ripples which occur over a frequency range of interest. Group delay takes this into account since it is the differentiated phase response. **Group delay is often a more easily interpreted indication of phase distortion.** (note. Like in an amplifier Hafler XL-280)

Почему обычно измеряют как отклонение от линейной фазы, так и групповую задержку? В зависимости от устройства оба могут быть важны. Указание максимального значения размаха фазовой пульсации недостаточно для полной характеристики устройства, поскольку наклон фазовой пульсации зависит от количества пульсаций, возникающих в интересующем диапазоне частот. Групповая задержка учитывает это, поскольку это дифференцированная фазовая характеристика. **Групповая задержка часто является более легко интерпретируемым признаком фазового искажения.** (прим. Как например в усилителе Hafler XL-280)

The plot above shows that the same value of peak-to-peak phase ripple can result in substantially different group delay responses. **The response on the right with the larger group-delay variation would cause more signal distortion.**

На приведенном выше графике показано, что одно и то же значение размаха неравномерности фазы может привести к существенно разным характеристикам групповой задержки. **Отклик справа с большим изменением групповой задержки вызовет большее искажение сигнала.**