

Анализ цепей – это процесс, при помощи которого инженер-разработчик измеряет электрические параметры компонентов и схем, которые впоследствии используются в более сложных системах. Когда в подобных системах передаются сигналы, содержащие информацию, основной заботой инженера является передача сигнала из одной точки в другую с максимальной эффективностью и минимальными искажениями. Векторный анализ представляет собой метод точной оценки параметров РЧ и СВЧ компонентов путем измерения их влияния на фазовые и амплитудные характеристики зондирующего сигнала, который качается по частоте или по мощности.

Компания Agilent Technologies предлагает широкий спектр как скалярных, так и векторных анализаторов цепей для диапазона DC...110ГГц. Все приборы могут комплектоваться различными опциями для упрощения их использования как в лабораторных условиях, так и при производственном контроле.

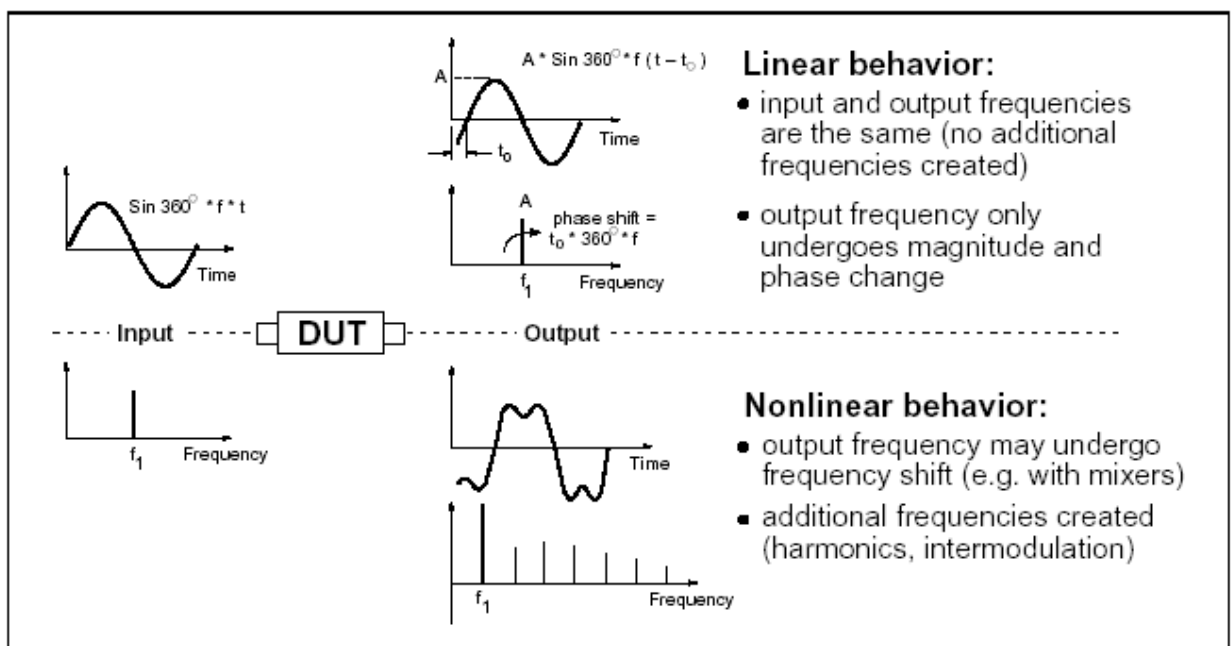
В любой системе связи следует рассматривать эффект искажения сигнала. Хотя обычно, говоря об искажениях, мы имеем в виду эффект интермодуляционных искажений (когда, например, сигналы несущей порождают интермодуляционные продукты), линейные системы также могут вносить искажения. Линейные системы могут изменять во времени

форму волны сигнала, проходящего через них, путем изменения амплитудных или фазовых соотношений спектральных составляющих сигнала.

Давайте рассмотрим различие между линейным и нелинейным поведением более подробно.

Линейные устройства изменяют входные сигналы по величине и фазе. Любой синусоидальный сигнал, поступающий на вход, появится и на выходе устройства на той же самой частоте. Новых сигналов при этом не создается. Как активные, так и пассивные нелинейные устройства могут сместить входной сигнал по частоте или внести дополнительные частотные компоненты, например, гармоники или нежелательные комбинационные составляющие. Мощные входные сигналы могут изменить характер работы линейных устройств, приводя к компрессии или насыщению и вызывая нелинейный эффект.

Рисунок 1. Линейное и нелинейное поведение.



Для достижения передачи без линейных искажений амплитудная характеристика тестируемого устройства должна быть ровной, а фазовая характеристика в заданной полосе – линейной. В качестве примера рассмотрим меандр, который часто встречается применительно к СВЧ компонентам. Меандр проходит через полосно-пропускающий фильтр, который пропускает заданные частоты, внося минимальное затухание, и ослабляет частоты вне полосы фильтра на определенную переменную величину.

Даже если фильтр имеет линейную характеристику фазы, не попадающие в полосу компоненты меандра будут ослаблены, в результате чего на выходе мы будем иметь сигнал скорее синусоидальной формы.

Если тот же самый меандр пропустить через фильтр, который лишь инвертирует фазу третьей гармоники, не меняя при этом уровня, то на выходе мы получим подобие импульсного сигнала. Хотя вышесказанное верно для примера с фильтром в целом, на самом деле сигнал на выходе будет иметь произвольные искажения, связанные с нелинейностью фазы и амплитуды.

Рисунок 2. Изменение величины сигнала заданной частоты.

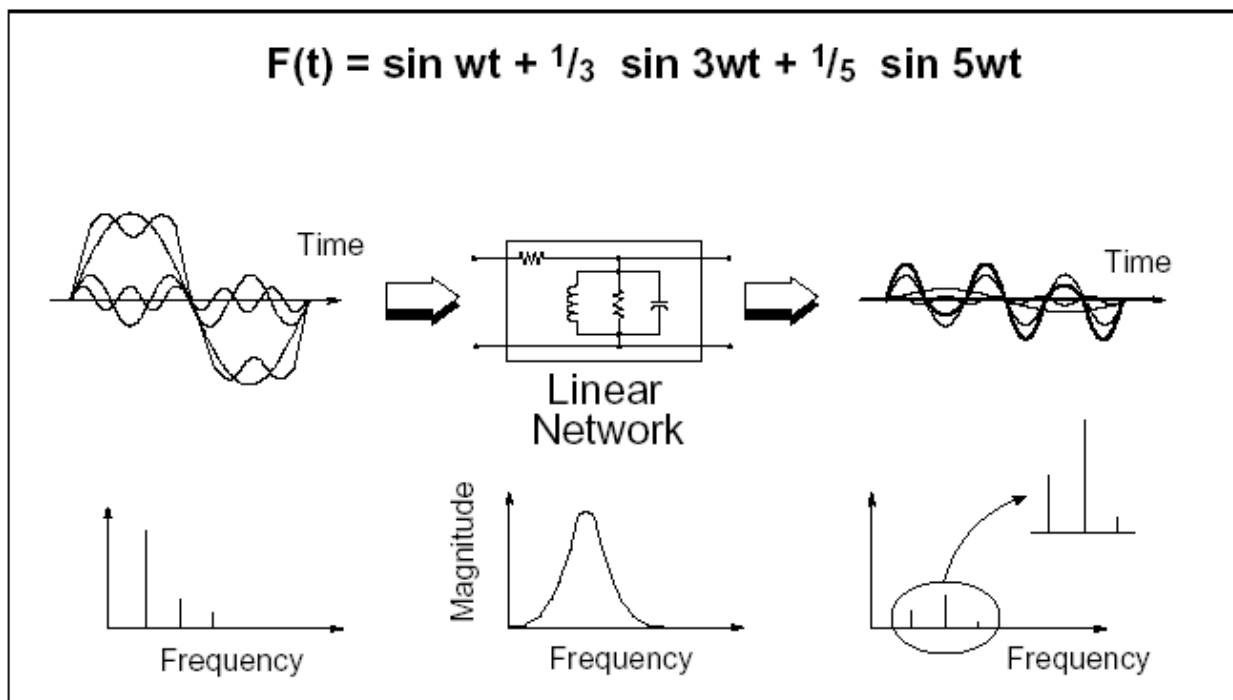
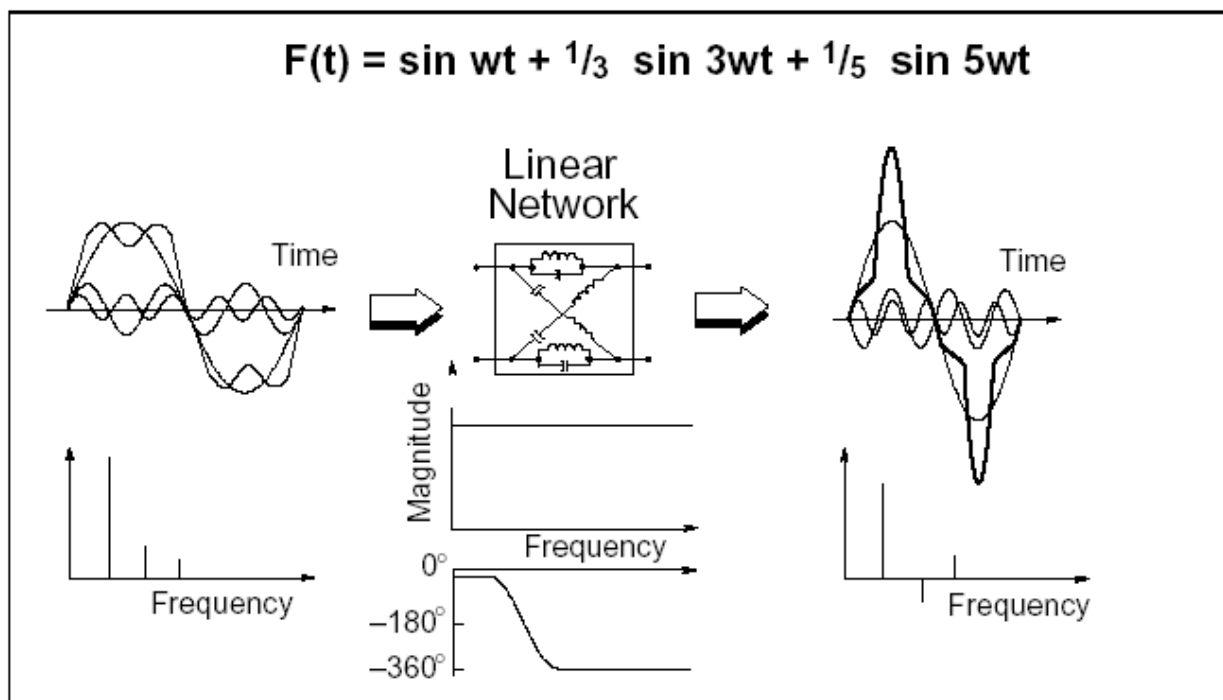


Рисунок 3. Изменение фазы сигнала заданной частоты.

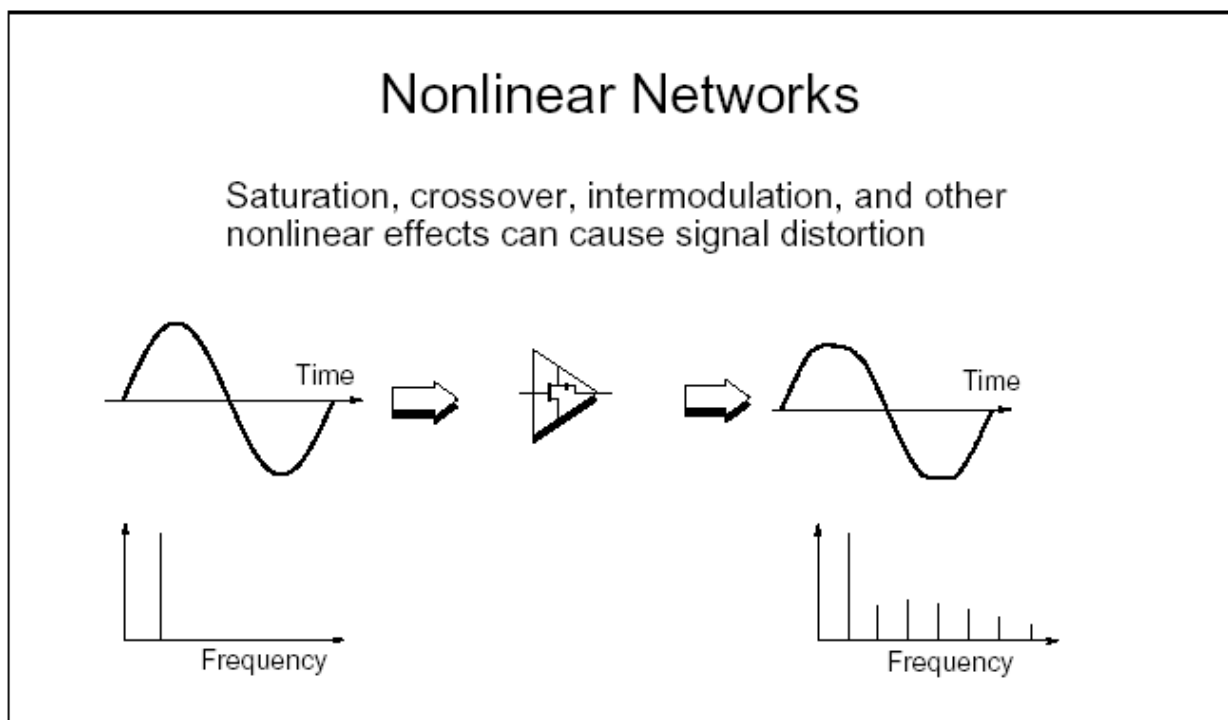


Нелинейные устройства также вносят искажения (рисунок 4). Например, при перегрузке усилителя сигнал на выходе ограничивается (клиппирует). Он более не является чистой синусоидой, в нем присутствуют гармоники, кратные несущей. Пассивные устройства также могут иметь нелинейное поведение при высоких уровнях мощности, хорошим примером является L-C фильтр, в котором используются индукторы с магнитным сердечником. Магнитные материалы часто вносят нелинейный эффект гистерезиса (запаздывания по фазе).

Эффективная передача мощности является еще одним фундаментальным вопросом в системах связи. Для того чтобы успешно передавать или принимать РЧ мощность, передающие устройства, такие, как тракты передачи, антенны или усилители, должны отличаться хорошим согласованием сопротивления с источником сигнала.

Рассогласование сопротивления происходит, когда реальные и мнимые части входного и выходного импеданса не идеально согласованы между двумя связанными устройствами.

Рисунок 4. Искажения, вносимые нелинейностью.



#### **Важность векторных измерений.**

Измерение не только величины, но и фазы РЧ и СВЧ компонентов важно в силу нескольких причин. Во-первых, оба упомянутых вида измерений необходимы для исследования линейной цепи и обеспечения передачи сигнала без искажений. Для разработки грамотно согласованных цепей необходимо измерять комплексный импеданс. Инженеры, занимающиеся разработкой программ для симуляции цепей в целях автоматизации конструирования, нуждаются в точных данных фазы и амплитуды для построения корректных моделей.

Кроме того, исследования во временной области требуют информации касательно магнитуды и фазы, для того чтобы осуществить преобразование Лапласа (обратное преобразованию Фурье). Коррекция векторной ошибки, которая помогает улучшить точность измерений, снимая эффект ошибок, свойственных самой измерительной системе, требует данных как по амплитуде, так и по фазе для построения правильной модели. Измерения фазы очень важны даже и в скалярных измерениях, например, обратных потерь, для достижения высокого уровня точности.

#### **Основы падающей и отраженной мощности.**

В своей принципиальной форме анализ цепей подразумевает измерение падающей, отраженной и переданной волны в тракте передачи. Используя в качестве аналогии оптику (рисунок 5), мы можем сказать, что свет, падающий на чистую линзу, представляет собой падающую волну, часть света отражается, и это - отраженная волна, большая же часть света, определенным образом преломляясь, проходит через линзу, и это - переданная энергия. Если линза имеет зеркальную поверхность, то большая часть света отразится, и передано будет мало энергии или же вообще никакой.

Хотя длины волн в оптике отличны от РЧ и СВЧ сигналов, принципы здесь те же самые. Анализаторы цепей позволяют точно измерять падающую, отраженную и переданную энергию, иными словами, энергию, которая подается на вход тракта передачи, энергию, которая отражается на источник сигнала (из-за рассогласования сопротивлений), и энергию, которая успешно передается на конечное устройство, например, на антенну.

Рисунок 5. Оптическая аналогия исследований РЧ и СВЧ устройств.

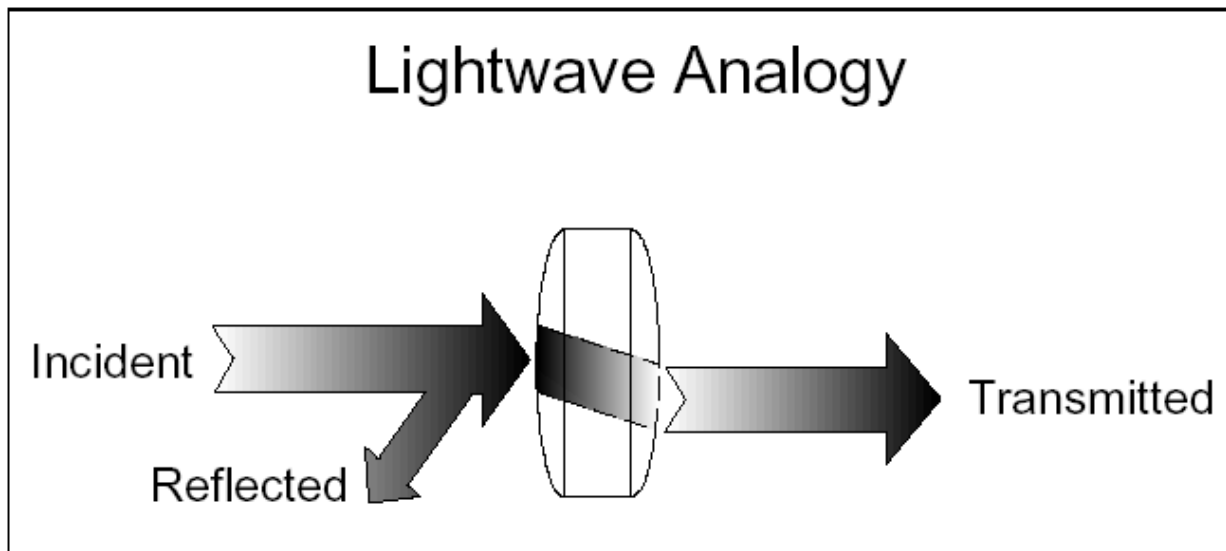


Диаграмма Вольперта-Смита.

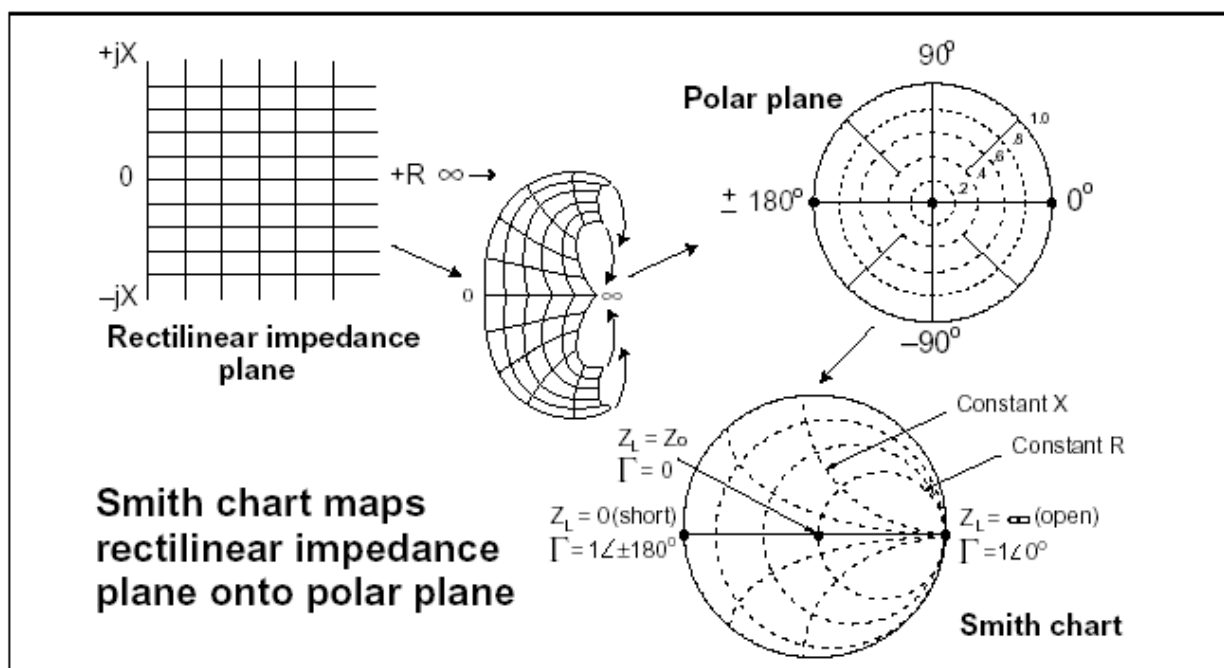
Величина отраженной мощности при исследовании СВЧ устройства зависит от сопротивления, которое падающий сигнал «видит». Поскольку любое сопротивление можно представить в виде реальной и мнимой частей ( $R+jX$  или  $G+jB$ ), они могут быть нанесены на прямоугольную решетку, которая известна под названием плоскости комплексного сопротивления. К сожалению, открытая цепь представляет собой бесконечность на оси, где изображается реальная часть, и поэтому не может быть показана.

Полярное представление данных удобно, поскольку изображается вся плоскость сопротивлений. Однако, вместо того, чтобы представлять сопротивление в прямом виде, комплексный коэффициент отражения рисуется в векторной форме. Величина вектора – это расстояние от центра изображения, а фаза отображена как угол между вектором и прямой линией, идущей от центра изображения к правому краю. Недостаток полярного представления данных заключается в том, что величина сопротивления не может считываться с дисплея напрямую.

Поскольку между комплексным сопротивлением и коэффициентом отражения существует взаимнооднозначное соответствие, положительную половину реальной части комплексного сопротивления можно нанести на полярный график. В результате мы получаем диаграмму Смита. Все значения реактивного сопротивления и все положительные величины сопротивления от 0 до бесконечности попадают в пределы наружного круга диаграммы Смита (рисунок 6).

На диаграмме Смита точки постоянного сопротивления выглядят как окружности, в то время как точки реактивного сопротивления выглядят как дуги. Сопротивления на диаграмме Смита всегда приведены к типичному сопротивлению исследуемых компонента или системы, обычно 50 Ом для РЧ и СВЧ систем и 75 Ом для систем широкоэвещательного и кабельного телевидения. Идеальное согласование представляет собой центр диаграммы Смита.

Рисунок 6. Диаграмма Вольперта-Смита.



### Условия передачи мощности.

При соединении двух устройств, для максимальной передачи мощности в согласованную нагрузку, должно выполняться условие полного согласования при заданном сопротивлении источника сигнала  $R_S$  и заданном сопротивлении нагрузки  $R_L$ . Полное согласование осуществляется, когда  $R_S = R_L$ , оно верно, когда зондирующий сигнал задается и источником постоянного напряжения, и источником РЧ синусоидального сигнала (рисунок 7).

Когда сопротивление источника не является полностью активным, максимальная передача мощности происходит, когда сопротивление нагрузки равняется комплексно-сопряженному сопротивлению источника. Это условие выполняется путем изменения знака мнимой части сопротивления. Например, если  $R_S = 0.6 + j0.3$ , то комплексно-сопряженное сопротивление источника будет  $R_S^* = 0.6 - j0.3$ .

Необходимость в эффективной передаче мощности является одной из главных причин использования линий передачи на высоких частотах. На низких частотах (при волнах значительной длины) простого провода хватает для передачи мощности. Сопротивление провода относительно мало и практически не оказывает эффекта на низкочастотные сигналы. Напряжение и ток одинаковы независимо от того, где на проводе производится измерение.

На высоких частотах длины волн оказываются сопоставимы или меньше, нежели длина проводника в высокочастотной цепи, и передача волн может быть представлена в виде перемещающихся волн. Когда линия передачи согласована с нагрузкой одинакового с ней сопротивления, то на нагрузку передается максимум мощности. Если же сопротивления нагрузки и линии передачи не согласованы, то часть падающего сигнала не поглощается нагрузкой, а отражается на источник.

На рисунке восемь показан случай, когда линия передачи и нагрузка идеально согласованы, и вся передаваемая энергия поглощается нагрузкой. Глядя на огибающую РЧ сигнала относительно расстояния в тракте передачи, можно заметить, что стоячих волн практически нет, поскольку, не отражаясь, энергия распространяется только в одном направлении.

Рисунок 7. Передача мощности.

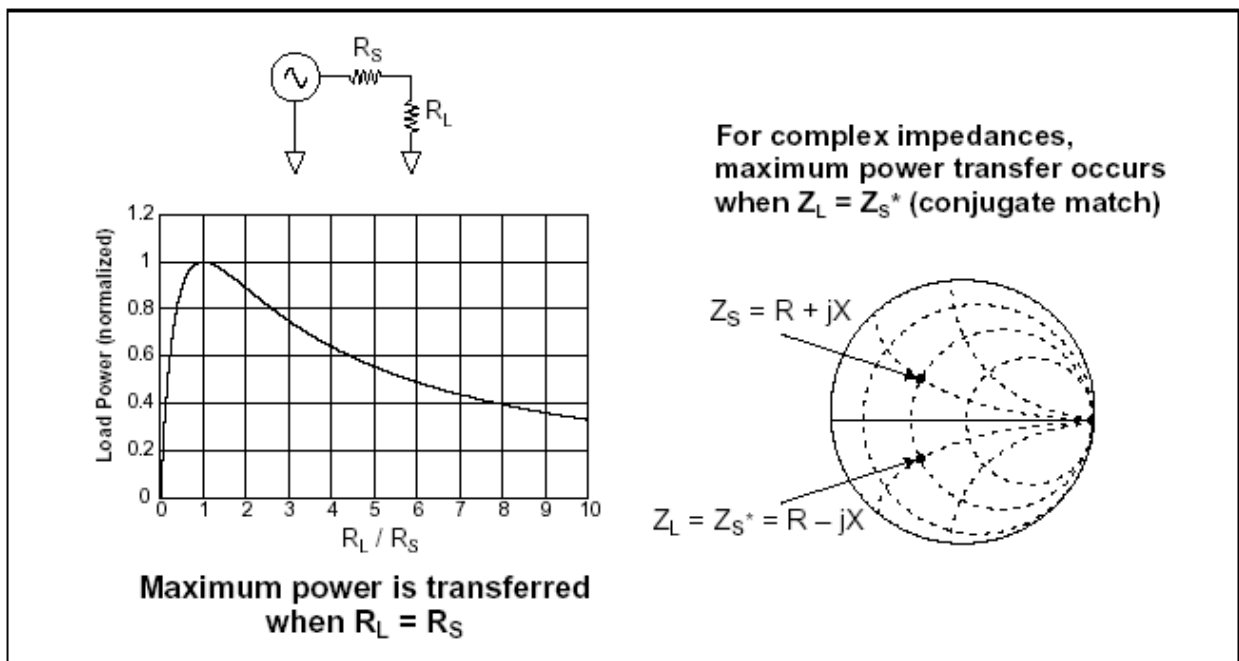
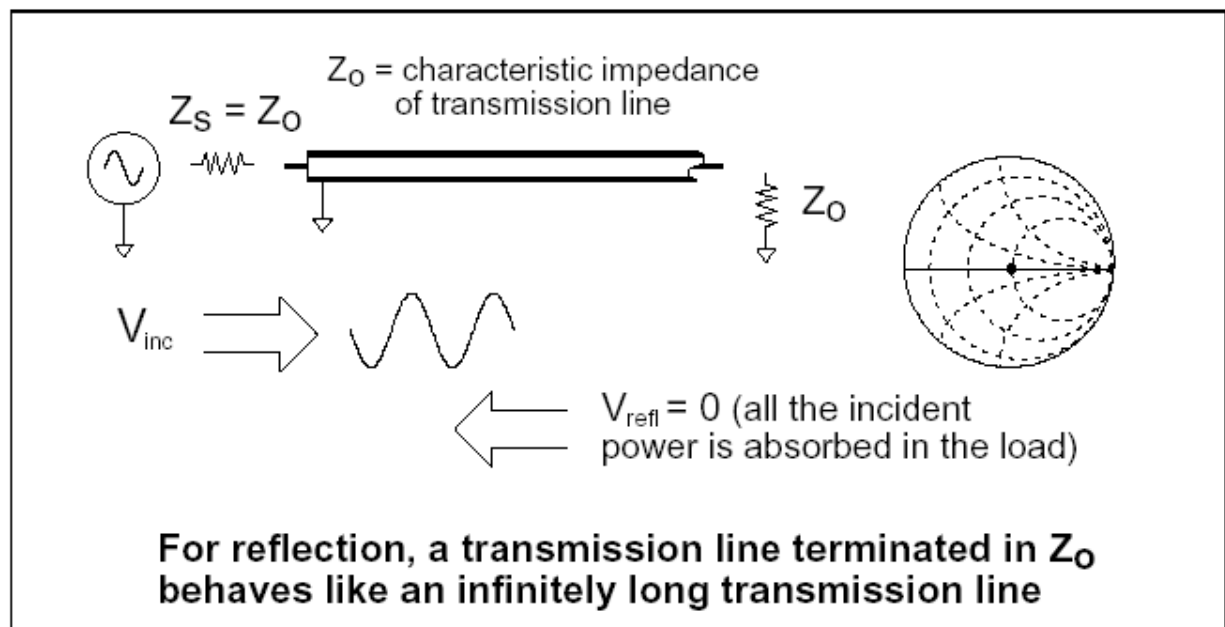


Рисунок 8. Линия передачи, идеально согласованная с нагрузкой  $Z_0$ .



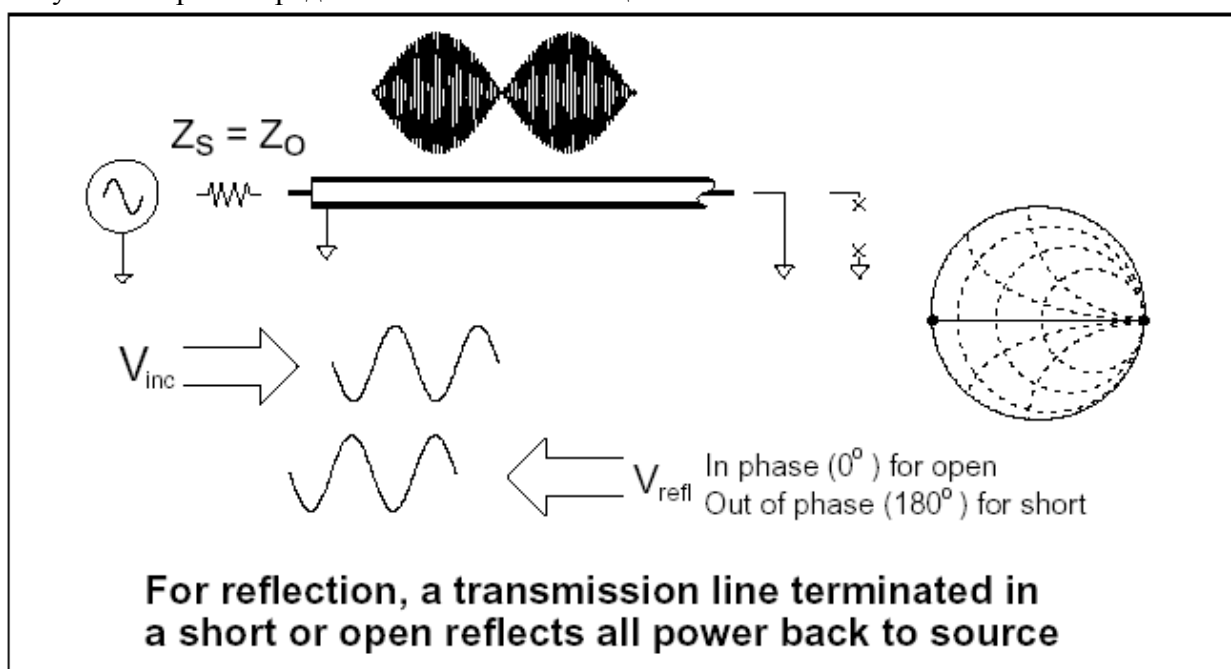
Когда на конце тракта передачи мы имеем короткое замыкание (которое не выдерживает напряжения и поэтому не рассеивает мощность), весь сигнал отражается на источник (рисунок 9). Отраженная волна напряжения должна по величине равняться падающей волне напряжения и на  $180^\circ$  отличаться от нее по фазе относительно плоскости согласованной нагрузки. Отраженная и падающая волна одинаковы по величине, но перемещаются в противоположных направлениях.

Если на конце тракта передачи мы имеем разомкнутую цепь (или холостой ход), которая не выдерживает тока, то отраженная волна тока будет на  $180^\circ$  отличаться по фазе от падающей волны тока относительно плоскости согласованной нагрузки. При этом падающая и отраженная волна напряжения будут совпадать по фазе. Это гарантирует, что ток в разомкнутой цепи будет равен нулю. Падающая и отраженная волна равны по величине, но перемещаются в противоположных направлениях. Как в случае с КЗ, так и в случае с ХХ в тракте передачи мы имеем стоячую волну. Минимум напряжения будет равен нулю, пик напряжения будет в два раза превышать пик напряжения падающей волны.

Если тракт передачи согласован, скажем, с 25-омным резистором, то часть падающей мощности поглощается, а часть отражается. Амплитуда отраженного напряжения составит одну треть от падающей волны, при этом две волны будут на  $180^\circ$  отличаться от плоскости согласованной нагрузки. Минимумы стоячей волны уже не будут равны нулю, а пики будут меньше максимумов в случаях с КЗ и ХХ, отношение максимума к минимуму (коэффициент стоячей волны по напряжению или КСВН) будет 2:1.

Традиционным способом измерения РЧ сопротивления был метод измерения КСВН при помощи РЧ детектора, измерительной линии с заданными точками и измерителя КСВН. По мере того, как детектор перемещался по точкам вдоль измерительной линии, относительные значения минимумов и максимумов фиксировались при помощи измерителя КСВН. Из этих измерений можно было вывести сопротивление. Процедура повторялась на разных частотах. Современные анализаторы цепей позволяют измерять мощность падающей и отраженной волны прямо во время качания частоты, а результаты измерения сопротивления можно отображать в различных форматах (включая КСВН).

Рисунок 9. Тракт передачи с КЗ и ХХ на конце.

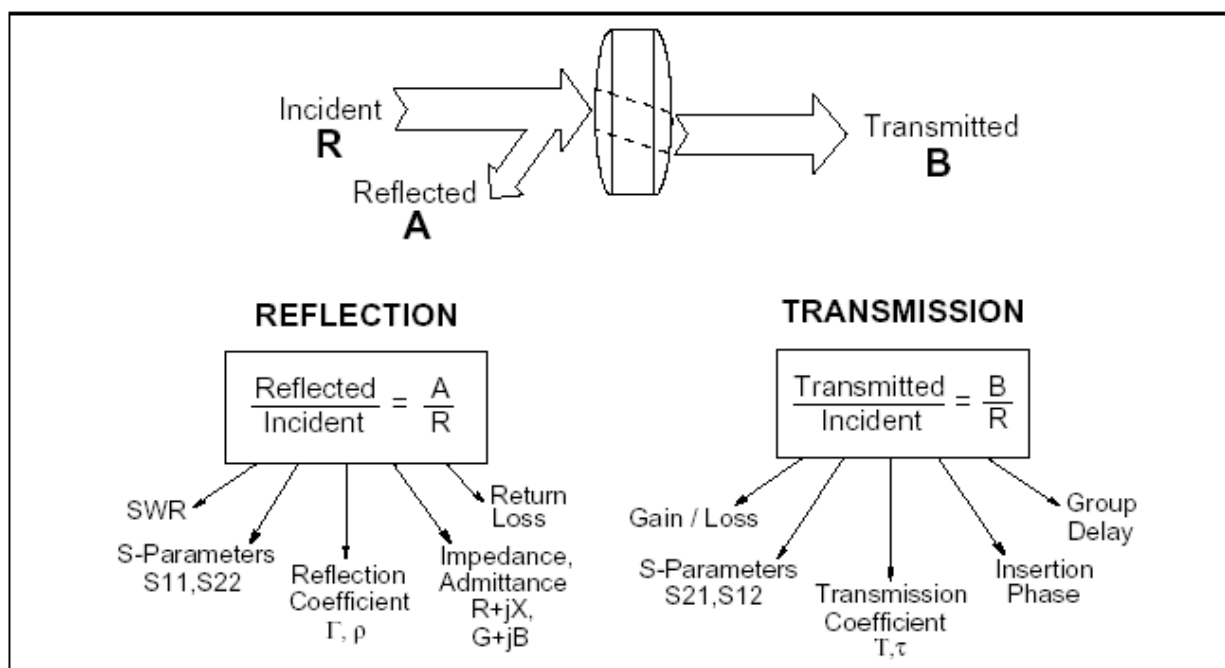


#### Терминология анализа цепей.

Теперь, когда мы уяснили себе основные принципы, касающиеся, электромагнитных волн, мы должны рассмотреть общие термины, которые используются при их измерении. В терминологии векторного анализа цепей падающая волна обычно обозначается как R (опорный канал). Отраженная волна измеряется на канале A, а переданная волна – на канале B (рисунок 10). Имея информацию об амплитуде и фазе этих волн, оказывается возможным измерить характеристики отражения и передачи тестируемого устройства. Параметры передачи и отражения могут быть представлены в векторном виде (фаза и амплитуда), скалярном виде (только амплитуда), а также только как фаза. Например, обратные потери – это скалярное измерение отражения, в то время как сопротивление – это векторное измерение отражения. Относительные измерения позволяют нам проводить исследования отражения и передачи, которые не зависят от абсолютной мощности или от изменений в мощности источника по отношению к частоте. Относительное отражение часто представляется в виде  $A/R$ , а относительная передача как  $B/R$  применительно к измерительным каналам прибора.

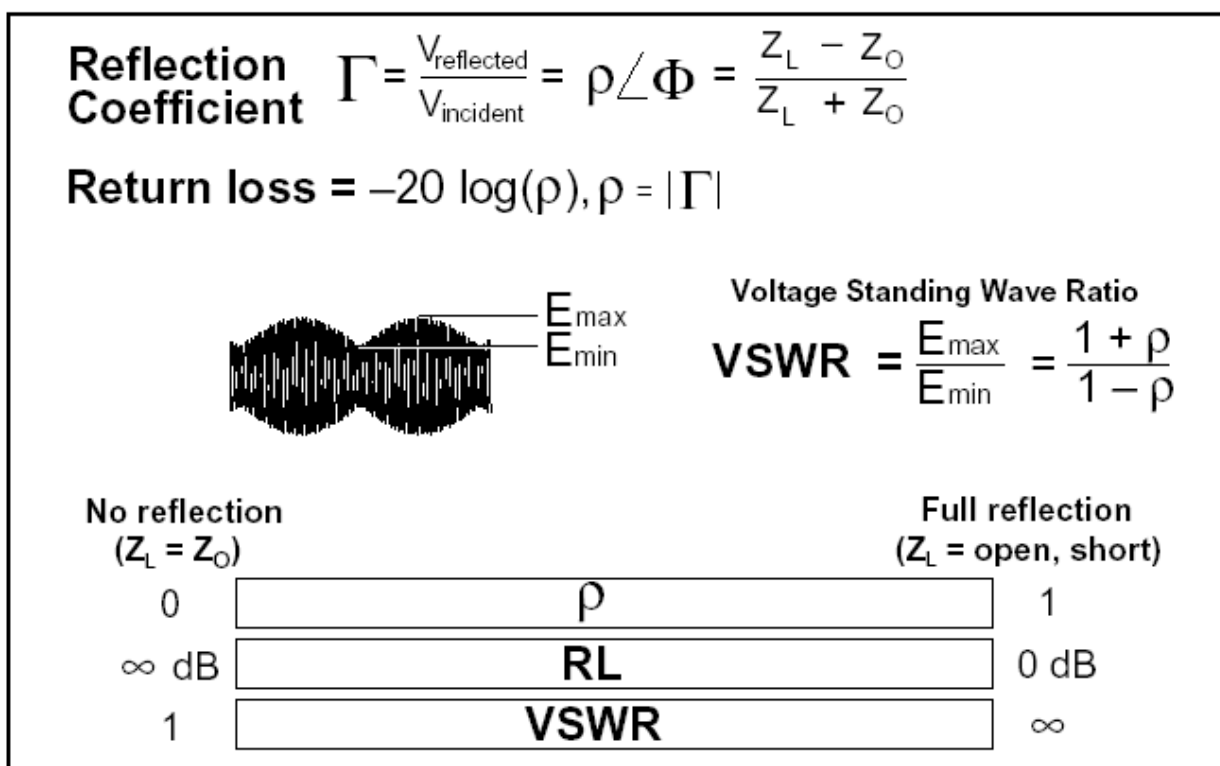
Рисунок 10. Общие термины для тестирования РЧ и СВЧ устройств.





Самый общий термин для относительного отражения – это комплексный коэффициент отражения, или  $\Gamma$  – гамма (рисунок 11). Амплитуда величины  $\Gamma$  называется  $\rho$  ( $\rho$ ). Коэффициент отражения – это отношение уровня напряжения отраженного сигнала к уровню напряжения падающего сигнала. Например, в тракте передачи, идеально согласованном с нагрузкой по сопротивлению  $Z_0$ , вся энергия будет передаваться, так что  $V_{refl}=0$  и  $\rho=0$ . Когда сопротивление нагрузки  $Z_L$  не равно сопротивлению тракта передачи  $Z_0$ , то часть энергии отражается и  $\rho$  больше нуля. Когда сопротивление нагрузки равно КЗ или ХХ, вся энергия отражается и  $\rho$  равно 1. Как видим, диапазон возможных значений для  $\rho$  – это  $0 \dots 1$ .

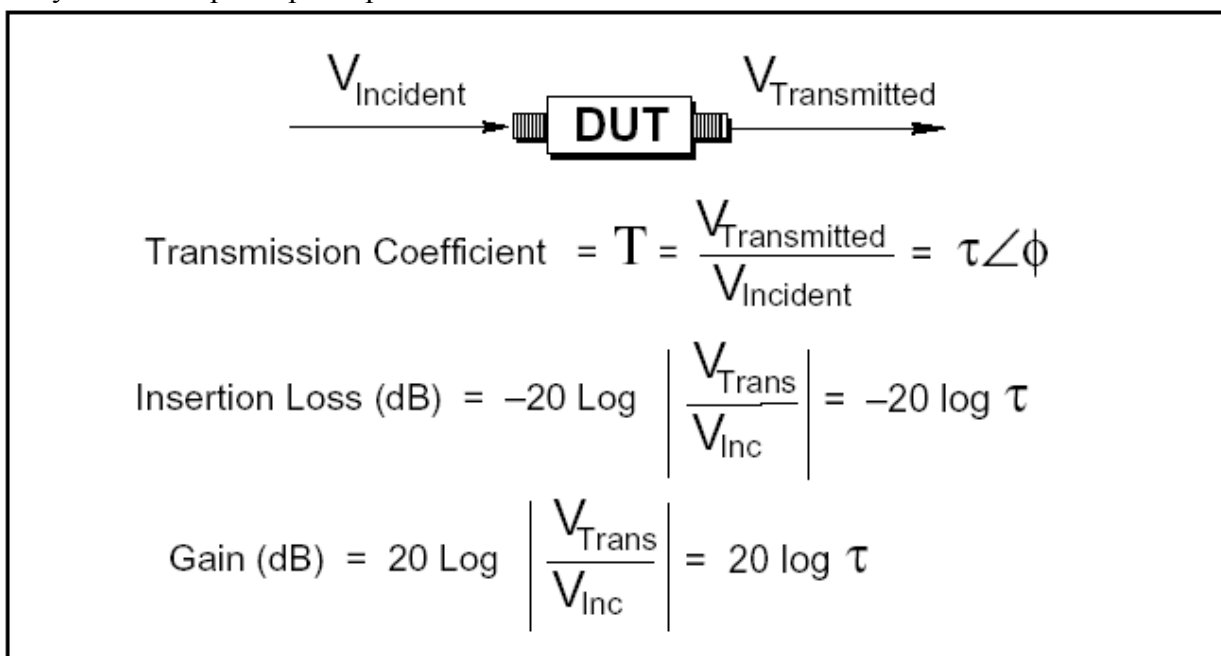
Рисунок 11. Параметры отражения.



Обратные потери – это способ выражения коэффициента отражения в логарифмическом виде (децибелах). Обратные потери в данном случае – это количество децибелов, на которое уровень отраженного сигнала ниже уровня падающего сигнала. Обратные потери всегда выражаются положительным числом и изменяются в пределах от бесконечности для идеально согласованного тракта передачи до 0дБ при КЗ или ХХ. Другой общий термин для оценки отражения – это коэффициент стоячей волны по напряжению или КСВН. Он определяется как отношение максимума РЧ огибающей к ее минимуму. Через  $\rho$  он выражается как  $(1+\rho)/(1-\rho)$ . Диапазон значений КСВН: от 1 (отражения нет) до бесконечности (полное отражение).

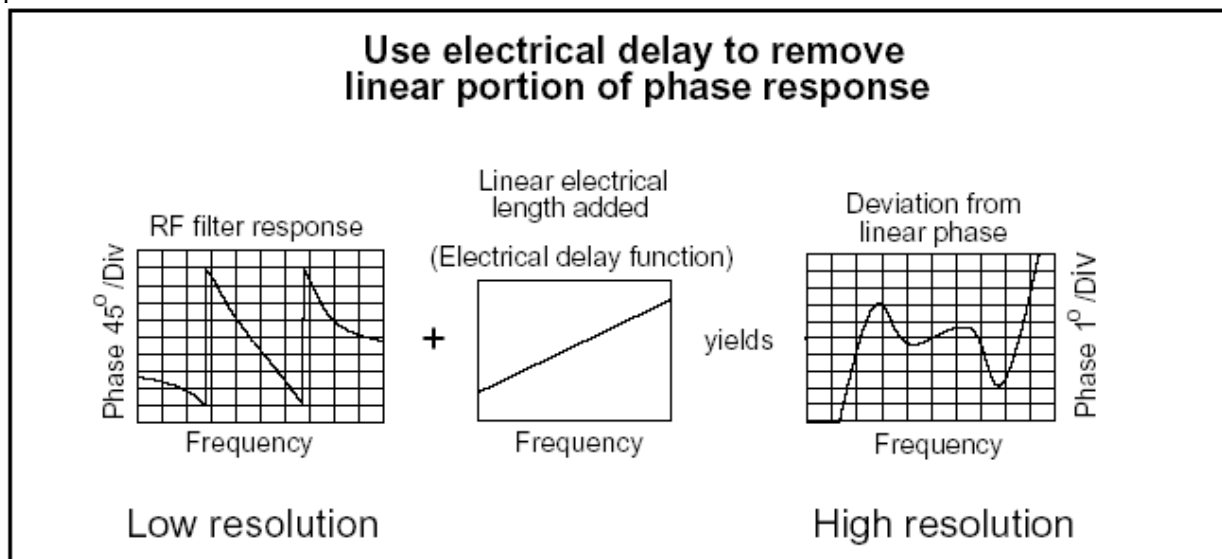
Коэффициент передачи определяется как отношение переданного напряжения к падающему напряжению (рисунок 12). Если абсолютное значение переданного напряжения больше, чем абсолютное значение падающего напряжения, то в тестируемом устройстве мы имеем усиление. Если абсолютное значение переданного напряжения меньше, чем абсолютное значение падающего напряжения, то в тестируемом устройстве мы имеем затухание либо вносимые потери. Фазовая составляющая коэффициента передачи, называется вносимой фазой.

Рисунок 12. Параметры передачи.



Прямое наблюдение за вносимой фазой обычно не дает ценной информации. Это происходит потому, что вносимая фаза обычно имеет большой отрицательный угол наклона относительно частоты из-за электрической длины тестируемого устройства. Угол наклона пропорционален длине тестируемого устройства. Поскольку лишь девиация от линейной фазы является причиной искажений в системах связи, желательно устранить линейную часть фазового отклика, для того чтобы проанализировать остающуюся нелинейную часть. Функция электрической задержки векторного анализатора цепей позволяет добиться этого за счет математического вычитания средней электрической длины тестируемого устройства. В результате мы получаем изображение фазовых искажений или отклонения от линейной фазы высокого разрешения (рисунок 13).

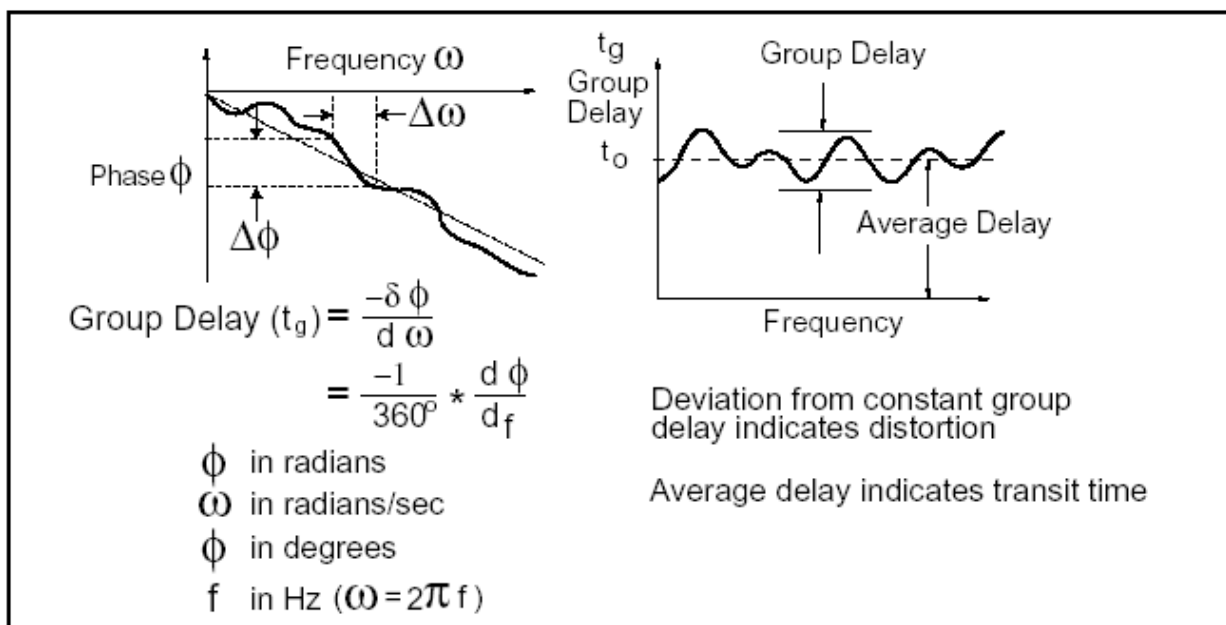
Рисунок 13. Использование электрической задержки для устранения линейной части фазового отклика.



### Измерение ГВЗ.

Другим полезным способом оценки фазового искажения является измерение группового времени запаздывания (рисунок 14). Этот параметр является отношением времени прохождения сигнала через тестируемое устройство к частоте. ГВЗ можно подсчитать продифференцировав фазовый отклик тестируемого устройства по частоте. ГВЗ сокращает линейную часть фазового отклика до постоянной величины и преобразует отклонения от линейной фазы в отклонения от постоянного ГВЗ (которые и являются причиной искажений в системах связи). Среднее время запаздывания отражает среднее время прохождения сигнала через тестируемое устройство.

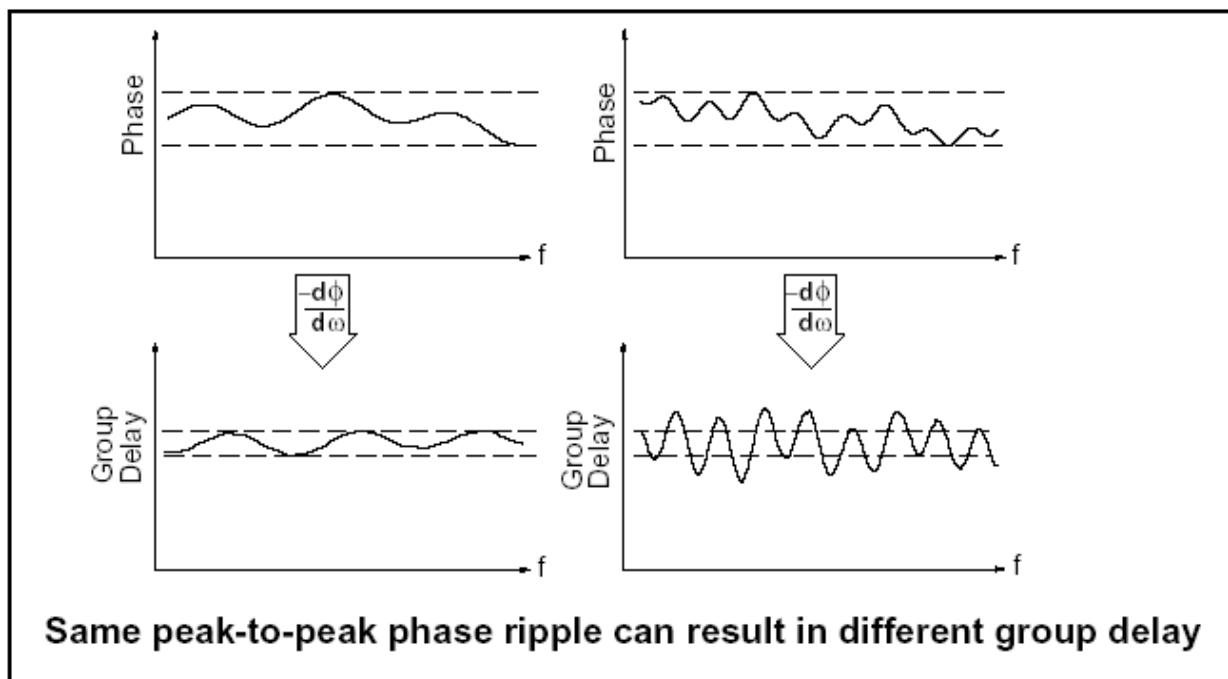
Рисунок 14. Что такое ГВЗ?



В зависимости от устройства, следует измерять как отклонение от линейной фазы, так и ГВЗ, поскольку оба этих параметра могут быть важны. Определения максимального межпикового фазового дрожания в устройстве может не хватить для его полной оценки, поскольку угол наклона фазового дрожания зависит от количества пульсаций, происходящих на определенном частотном отрезке. ГВЗ учитывает это, поскольку оно

является дифференциалом фазового отклика. ГВЗ – это индикатор фазовых искажений, который часто гораздо легче интерпретировать (рисунок 15).

Рисунок 15. Зачем измерять ГВЗ?



#### Исследование цепей.

Для того чтобы полностью исследовать неизвестное линейное двухпортовое устройство, мы должны провести измерения при разных условиях и вычислить целый ряд параметров. Эти параметры могут использоваться для полного описания электрического поведения вашего устройства (цепи), даже если источник и нагрузка окажутся отличными от тех, при которых производились измерения. Исследование низкочастотных устройств или цепей обычно основано на измерениях параметров  $H$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Для того чтобы провести подобные исследования, надо измерить общее напряжение и ток на входе и выходе устройства или узла цепи. Далее следует измерить устройство или цепь в условиях замкнутой и открытой цепи (соответственно, при КЗ или ХХ).

Поскольку на высоких частотах трудно измерить абсолютные значения напряжения и тока, обычно вместо них измеряются  $S$ -параметры (рисунок 16). Эти параметры соотносятся с уже знакомыми нам понятиями, такими, как усиление, потери и коэффициент отражения. Их относительно легко измерить, кроме того, они не требуют подключать к тестируемому устройству дополнительные, нежелательные нагрузки. Измеренные  $S$ -параметры нескольких устройств в системе можно сложить для того, чтобы понять, как будет работать вся система в целом.  $S$ -параметры используются в компьютерных приложениях по автоматизированному конструированию для симуляции как линейных, так и нелинейных схем. Величины же  $H$ ,  $Y$ ,  $Z$  могут быть, в случае необходимости, легко выведены из  $S$ -параметров.

Количество  $S$ -параметров для заданного устройства равно квадрату количества портов. Например, двухпортовое устройство имеет четыре  $S$ -параметра. Нумерация  $S$ -параметров осуществляется по следующему принципу: первая цифра указывает порт, на который энергия приходит, а вторая – порт, на который она первоначально подается. Так,  $S_{21}$  это результат измерения мощности, приходящей на порт 2 в результате подачи на порт 1 РЧ сигнала. Когда цифры совпадают (например,  $S_{11}$ ), речь идет об измерении характеристики отражения.

Рисунок 16. Ограничения для H, Y, Z, или зачем использовать S-параметры?

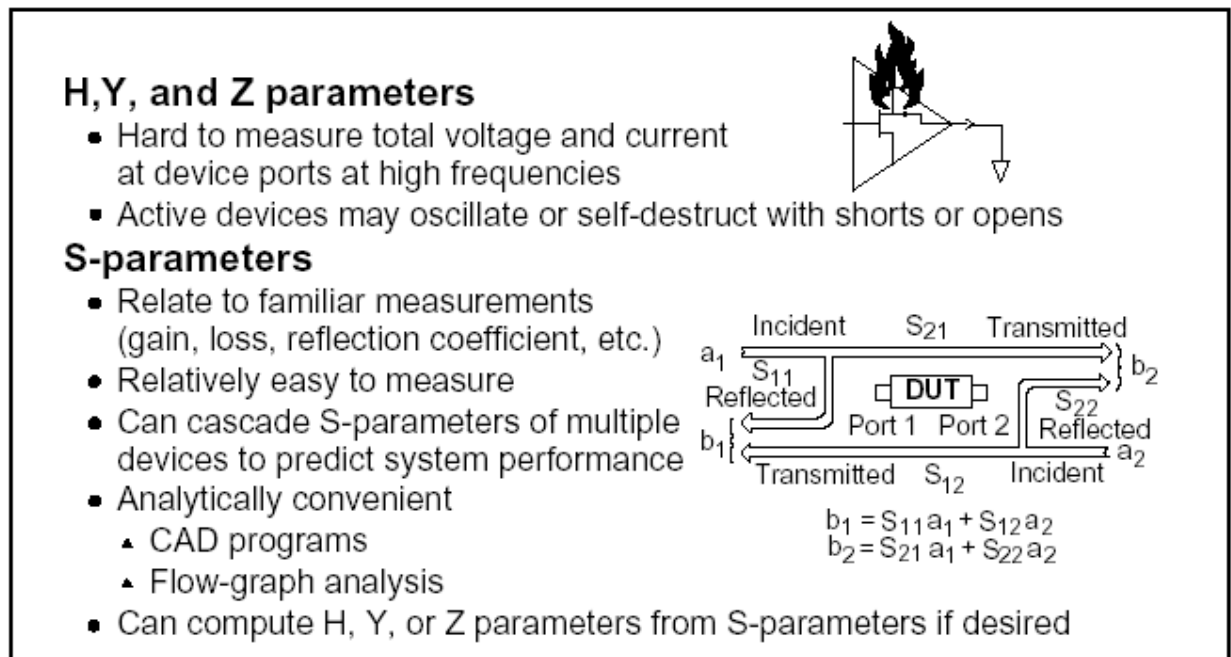
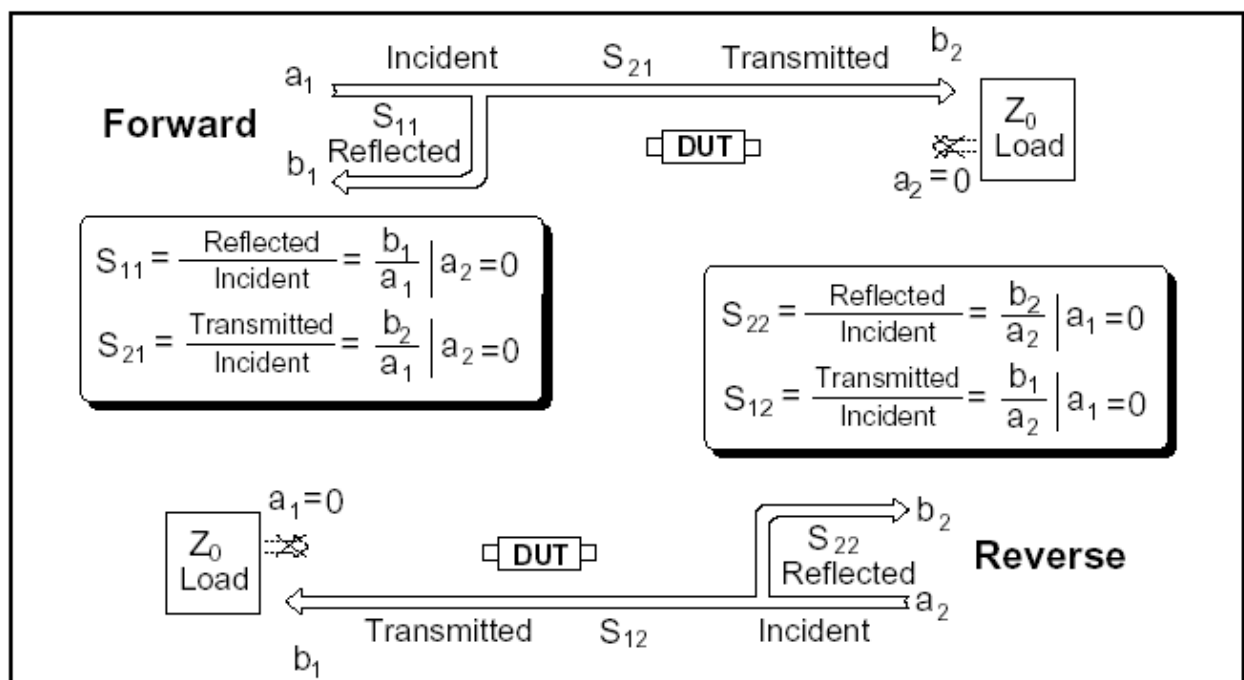


Рисунок 17. Измерение S-параметров



Прямые S-параметры определяются путем измерения модуля амплитуды и фазы падающего, отраженного и переданного сигналов, когда на выходе источника мы имеем нагрузку, точно согласованную с сопротивлением тестируемой системы. В случае двухпортовой цепи (четырёхполюсника)  $S_{11}$  является комплексным коэффициентом отражения или импедансом тестируемого устройства, а  $S_{21}$  – комплексным коэффициентом прямой передачи. Если мы подадим сигнал на выход тестируемого устройства, а на вход поместим согласованную нагрузку, то мы сможем измерить два другие (обратные) S-параметры. Параметр  $S_{22}$  равен выходному комплексному коэффициенту отражения или выходному сопротивлению тестируемого устройства, а  $S_{12}$  – это комплексный коэффициент обратной передачи (рисунок 17).