

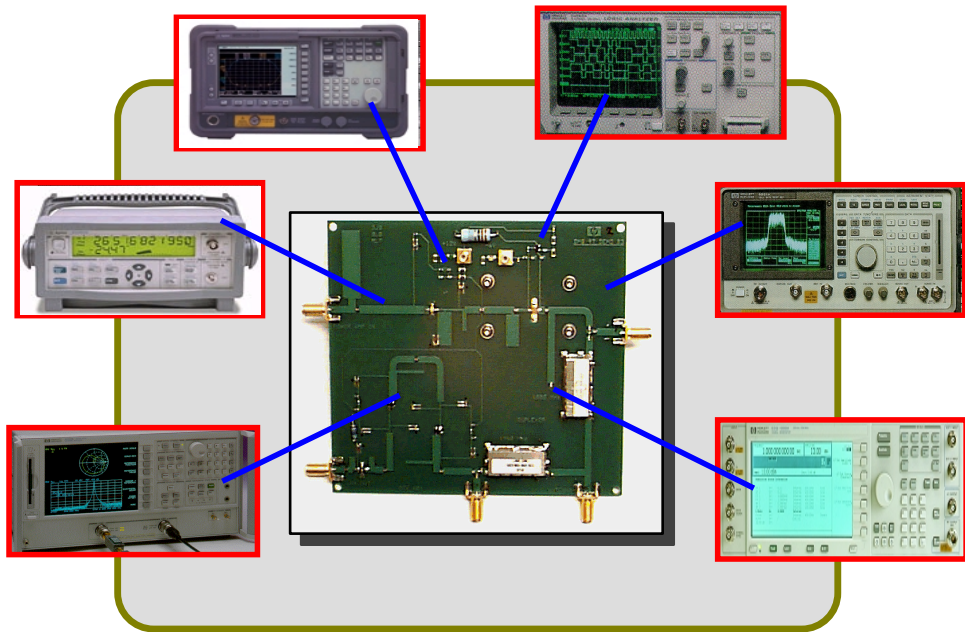
Лекция 1:

“Съвременна микровълнова лаборатория”

Основни въпроси:

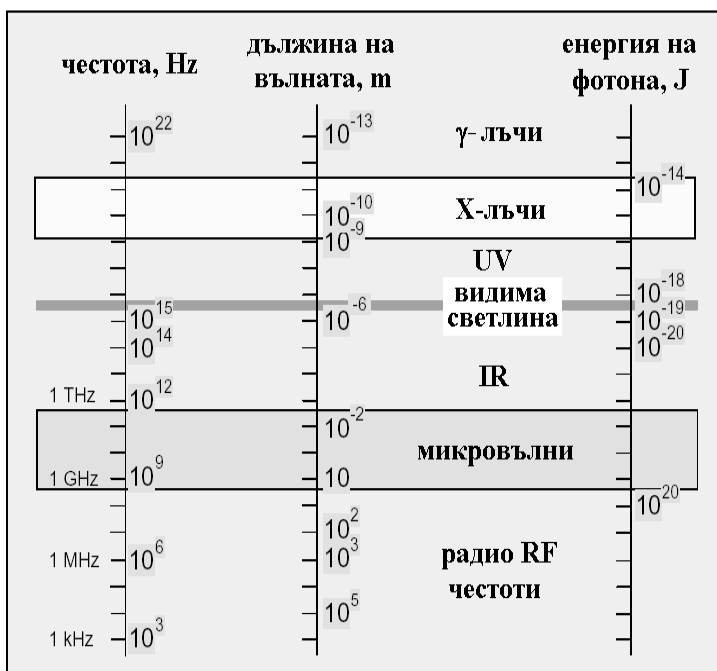
- ▲ Основни типове измервания в микровълновия обхват: на мощност, честота, Q фактор, спектри, S параметри, шум, полета и др.
- ▲ Микровълнови измерителни генератори: сигнал-генератори, генератори с линейно-изменяща се честота (sweep генератори); честотни синтезатори, генератори на шум
- ▲ Микровълнови индикационни устройства: детектори, сензори, смесители, конвертори и др.
- ▲ Допълнително измерително оборудване в микровълновия обхват: съгласувани товари, атенюатори, фазорегулатори, взаимни и не-взаимни разпределящи устройства и насочени отклонители, филтри, микровълнови измерителни кабели, съединители (адаптери) и преходи, сонди, калибриращи устройства и пр.
- ▲ Основни микровълнови измерителни системи: ватметри, честотомери, спектроанализатори, анализатори на вериги, измерители на шум и пр. Анализатори на сигнали. Измерителни системи за комуникационни цели.

1.1 Основни типове измервания в микровълновия обхват



Микровълнов обхват

Прието е, че микровълните са електромагнитни (ЕМ) вълни с честота 0.3-300 GHz (дължина на вълната 1000-1 mm). Те заемат относително малка част от използвания спектър, но днес тя вече се очертава като най-важната, особено за безжичните комуникации. По тази причина, познанията за микровълнови измервания в този обхват, са особено полезни за различни специалисти: комуникационни и микровълнови инженери, проектанти, физици и др.



Пример: Радио (RF) спектър

Лента	Обхват (f, λ)
VLF	3-30 kHz 100-10km
LF	30-300 kHz 10-1 km
MF	300-3000kHz 1-0.1 km
HF	3-30 MHz 100-10 m
VHF	30-300 MHz 10-1 m
UHF	300-3000GHz 1-0.1 m
SHF	3-30 GHz 10-1 cm
EHF	30-300 GHz 10-1 mm
THF	0.3-3 THz 1-0.1 mm
Far IR	300-30 μm
Near IR	~30 μm-1 μm
видима	~800-400 nm

Разделяне на микровълновия обхват

Самият микровълнов обхват не е хомогенен, а се разделя на допълнително. В Таблицата долу е представено едно все още популярно сред инженерите разделяне по честота (frequency bands): UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, mm (има по-ново разделяне на тази част на спектъра, но то все още не се възприема). Популярно е и следното разделяне на обхвати по дължина на вълната – дециметров (10-1 dm), сантиметров (10-1 cm), милиметров (10-1 mm), субмилиметров (< 1 mm). То отразява доста добре спецификата на сигналите в тези обхвати.

Използваемостта на сигналите в микровълновия обхват не е еднаква в различните му части. Към днешна дата най-употребяван е дециметровия обхват (tv разпръскване, мобилни връзки, нагряване и сушене). Сантиметровият се използва за връзки с пряка видимост (WLAN, сателитни). Това са типично микровълнови сигнали. Напоследък силно се разви милиметровият обхват, а най-модерен днес е т. нар. “терахерцов” обхват.



Означение	Обхват
VHF	100-300 MHz
UHF	300-1000 MHz
L	1-2 GHz
S	2-4 GHz
C	4-8 GHz
X	8-12 GHz
Ku	12-18 GHz
K	18-26 GHz
Ka	26-40 GHz
Millimeter	30-300 GHz
Sub-mm	0.3-3 THz

Специфика и основни измервания в микровълновия обхват

Голямата разлика в дължината на вълната λ в микровълновия обхват означава, че микровълнови устройства могат да бъдат по-малки, сравними или по-големи от λ . Поради тази причина разглеждането на сигналите и устройствата в микровълновия обхват става по *смесен подход* (комбинация от *схемен*, както е в RF електроника, и *вълнов*, както е във физичната оптика). При измерване на микровълнови устройства се използват както физични величини, характерни за целия електромагнитен спектър (честота, мощност, спектри, импеданси и пр., така и специфични величини, използвани главно в този обхват (коефициент на стояща вълна, S-параметри, коефициент на шум и пр.). Например, за честоти над няколко десетки MHz практически не се измерва високочестотен ток и напрежение, а се работи основно с осреднената високочестотна мощност и обратно.

По-надолу са изброени най-важните величини, подлежащи на микровълнови измервания:

- ❖ Измерване на микровълнова **мощност** (с помощта на ватметри, power meters);
- ❖ Измерване на **честота** (честотомери; frequency counters); измерване на Q-фактор;
- ❖ Измерване на **спектри** на сигнали (спектроанализатори; spectrum analyzers);
- ❖ Измерване на **S-параметри** и свързани с тях (анализатори на вериги; network analyzers); измерване на комплексни импеданси/адмитанси; на активни устройства; TDR измервания;
- ❖ Измерване на **коефициент на шум и шумова температура** (шумомер; noise-figure meters)
- ❖ Измерване на **микровълнови полета** (микровълнови сонди и антени);
- ❖ **Антенни** измервания; **EMC/EMI** измервания на електромагнитна съвместимост;
- ❖ Измерване на **параметрите на веществата** (диелектрични, магнитни и др.);
- ❖ **Други измервания** (грапавост, влажност), радарни и радиоастрономически измервания

Подход към всяко отделно измерване

За разлика от измерванията в ниско-честотната електроника, които са добре стандартизирани, измерват се добре дефинирани величини и принципно са по-ясни, микровълновите измервания са по-разнообразни и сложни, величините не винаги са добре дефинирани и по принцип се нуждаят от по-голямо внимание. На какви въпроси трябва да се отговори при всяко отделно измерване на микровълново устройство:

- ✓ Какви [параметри](#) на устройството ще се измерват, за да се характеризира най-добре?
- ✓ С какви [измерителни схеми](#) ще се измерват тези параметри, с какви устройства?
- ✓ Какви [методи](#) ще се използва при измерването с избраните измерителни схеми?
- ✓ Как трябва [да се интерпретират резултатите](#) от измерването (точност, повторимост)?

Пример: Нека задачата е да се измери изходното ниво на микровълнов осцилатор

- ✓ *Измерван параметър:* изходното ниво се характеризира най-добре със средната или импулсната мощност на сигнала в mW, dBm. Най-лесно е тя да може да се измери с помощта на ватметър. Ако, обаче, допълнително трябва да се установи и честота, спектър, фазов шум, честотна нестабилност и пр., е по-добре да се използва спектроанализатор;
- ✓ *Измерителна схема:* ако изберем ватметър, той може да се включи към изхода на осцилатора като краен товар, през насочен отклонител (за мониторинг) и др. Във всички случаи, ако нивото е неизвестно или голямо, трябва да се използва защитен атенуатор;
- ✓ *Измерителен метод:* в зависимост от нивото на сигнала (малко, средно, голямо) може да се използва метод на директното измерване, метод на заместването и др. методи;
- ✓ *Интерпретация на измерените резултати:* точност на измерването, повторимост, динамичен обхват на измерването и др. Значение има съгласуването на изходният съединител, дължината на използвания кабел, температурата и др. условия на измерването.

Най-разпространени принципи за измерване на микровълнов сигнал; микровълнови сензори

В нискочестотната електроника измерването на тока и напрежението в определени части на схемите в много случаи е напълно достатъчно за тяхното характеризиране. В микровълновия обхват това съвсем не е достатъчно. В зависимост от измервания параметър е необходима разнообразна информация за разпространяващата се ЕМ вълна, получена с различни датчици (сензори). По-долу са изброени най-използваните принципи за измерване на микровълнови сигнали (измерители; сензори):

- ❖ Измерители, използващи [информация за падащата, отразената и преминалата вълна](#) – така се определят S-параметрите, коефициентите на отражение и преминаване и др. Информацията се извлича с помощта на насочени отклонители, рефлектометрични мостове и др. разпределящи устройства;
- ❖ Измерители, използващи [информация за разпределението на ЕМ на на стоящата вълна](#) в предавателна линия, включваща устройството и сравнението ѝ с информацията за референтната стояща вълна от известни устройства, напр. “късо съединение/празен ход” (“short/open end”, съгласуван товар и др.). Това са вълноводни измервателни линии, поляризационни измерители и др. за определяне на коефициент на стояща вълна, импеданси и др.;
- ❖ Измерители, сравняващи [отклика от измерваното устройство \(товар\)](#) с този от образцов товар. Това са различни мостови измерителни схеми;
- ❖ Измерители, основаващи се на [пренос на измерването от микровълновия обхват в други обхвати](#) – конверсия надолу към ниско-честотния обхват или нагоре към оптичния/инфракчервения обхват. Това са най-разпространения тип измерители: детектори, смесители, датчици за мощност, ватметри, хетеродинни приемници, фотоумножители и пр.

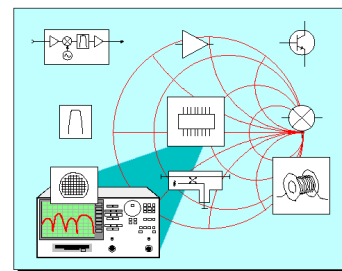
Основно измерително оборудване на една съвременна микровълнова лаборатория

Една съвременна лаборатория по нискочестотна електроника се нуждае основно от сигнал-генератори, функционални генератори, осцилоскопи, комбинирани измерители на ток и напрежение (мултицети), честотомери и др. В комуникационната техника има нужда от допълнителна апаратура. В една съвременна микровълнова лаборатория необходимото оборудване е значително повече и по-сложно. По-долу изброяваме част от това оборудване (в отделни лекции (вкл. в настоящата) то е разгледано с по-големи подробности):

- ❖ **Микровълнови измерителни генератори:** сигнал-генератори; sweep генератори с линейно изменяща се честота, синтезатори със стъпаловидно изменение на честотата и на мощността. Тези генератори за постоянен (CW) сигнал, но много от тях поддържат всички съвременни типове модуляции, използвани главно в безжичните комуникации.
- ❖ **Микровълнови детектори, сензори, смесители и индикационни устройства:** това са устройства за регистрация и приемане на микровълнов сигнал и дисплеи на резултатите.
- ❖ **Допълнително измерително оборудване:** това са измерителни принадлежности (аксесоари), чрез които се извършват микровълновите измервания: съгласувани товари, атенюатори, фазорегулатори, взаимни и невзаимни разпределящи устройства, филтри, микровълнови измерителни кабели, съединители и преходи, антени, калибриращи устройства и пр.
- ❖ **Микровълнови измерителни системи:** това са компютърно управляеми системи от устройства и аксесоари за измерване на даден параметър или комплект от параметри. Това са най-използваните съвременни измерителни средства, които включват в състава си управляеми източници, сензори, допълнително оборудване и индикационни системи. Такива са ватметрите, честотомерите, спектроанализаторите, анализаторите на вериги, шумомерите и пр.

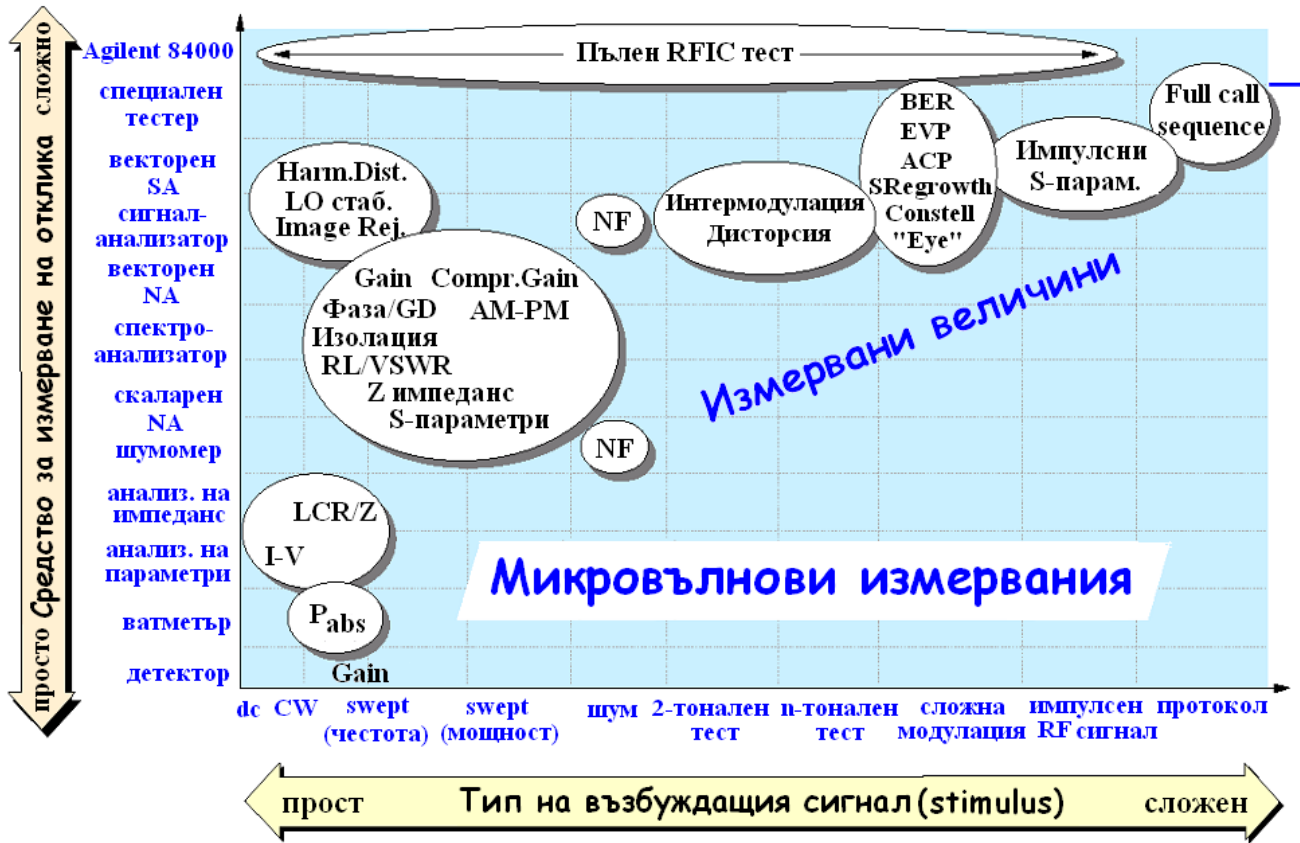
Необходимият минимум микровълново оборудване

Не е задължително дадена микровълнова лаборатория да има всички измерителни средства в този обхват, но определен минимум от тях е необходим за сериозни измервания. Днес най-комплексният измерителен прибор е *анализаторът на вериги (NA)* – скаларен или векторен, заедно с необходимите аксесоари. Той е удобен при линейни измервания в различни честотни ленти на пасивни и активни устройства. При измерване на активни устройства е нужен и *измерител на шум*. Полезни устройства са още *ватметър* и по-малко – *честотомер*. За изследване на спектри на модулирани сигнали и на нелинейни ефекти в активни устройства, полезно устройство е *спектроанализаторът*. Той може да замени ватметъра, честотомера и дори скаларния NA (в комбинация със следящ генератор), но е доста по-скъп от тях. За по-специфични измервания (в комуникациите, за интегрални схеми и др.) се използват и по-специални прибори и тестери. Напр., днес много популярен е *анализаторът на сигнали*. Полезна информация има във фигурите на следващите две страници (без текстов коментар). По-долу са дадени някои използвани там означения и съкращения:

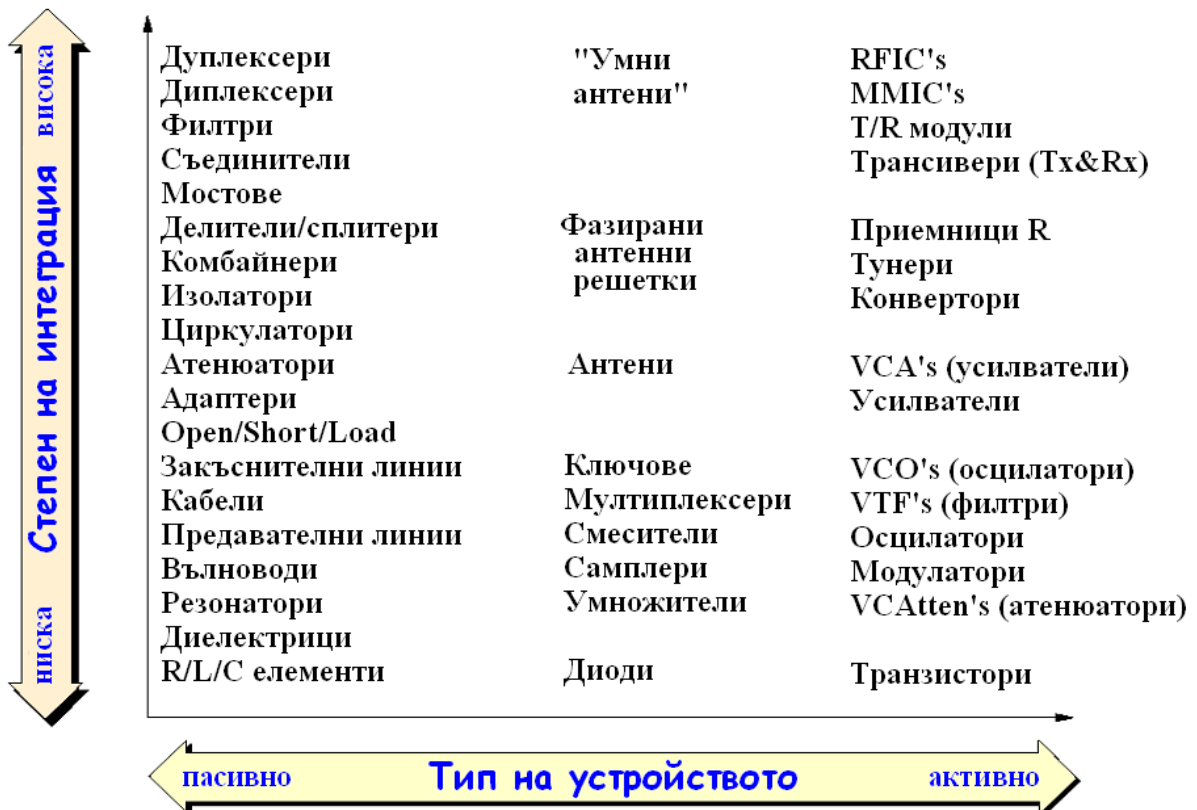


RFIC's (Radio-Frequency Integrated Circuits); MMIC's (Monolithic Microwave Integrated Circuits); VCO's (Voltage-Controlled Oscillators); VCA's (Voltage-Controlled Attenuators); VTF's (Voltage-Tuned Filters); VCAten's (Voltage-Controlled Attenuators); SA (Spectrum Analyzers); NA (Network Analyzers); SA (Signal Analyzers); VSA (Vector Signal Analyzers); RL (Return Losses); VSWR (Voltage Standing-Wave Ratio); NF (Noise Figure); BER (Bit-Error Rate); EVP (Error-Vector Magnitude); ACP (Adjacent Channel Power); LO (Local Oscillator); Harm. Dist (Harmonic Distortion); ImageRej. (Image Rejection); Compr. Gain (Compression Gain); GD (Group Delay); AM-PM (конверсия AM-PM); SRegrowth (Spectral Regrowth); Constell. (диаграма Constellation); "Eye" (диаграма "Eye"). (Забележка: повечето от тези величини и устройства се разглеждат и по-нататък в лекциите).

Карта на най-често срещаните микровълнови измервания: параметри, възбуждащи сигнали и средства за измерване



Най-често измервани микровълнови устройства по степен на интеграция (пасивни, смесени, активни)



1.2 Микровълнови измерителни генератори



Измерителни генератори в микровълновия обхват и техните основни метрологични характеристики

При измерванията в даден честотен обхват е важно да има подходящи източници на сигнал, т.е. *измерителни генератори*. В микровълновия обхват те са от следните типове:

- ❖ **Микровълнови сигнал-генератори:** електронно-управляеми източници с плавна ръчна или електронна регулировка на честотата и изходната мощност;
- ❖ **Микровълнови генератори с линейно изменяща се честота (sweep генератори):** за панорамно измерване на S-параметрите на устройствата
- ❖ **Честотни синтезатори:** бързо-пренастройваеми по честота генератори с достатъчно малка дискретна стъпка и с висока стабилност на честотата на генерация; позволяват и плавна пренастройка по ниво на сигнала при фиксирана честота. Това са съвременните микровълнови измерителни генератори;
- ❖ **Микровълнови генератори на шум:** за характеризиране на коефициент на шум по метода на “студеното” и “горещото” измерване.

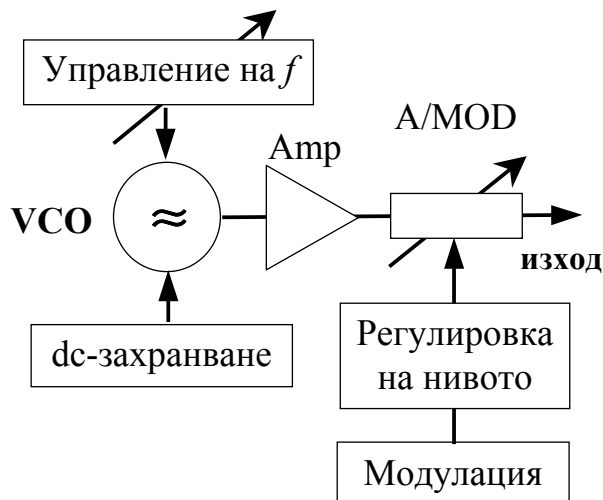
Измерителните генератори имат следните най-важни *метрологични характеристики*:

- ❖ **Диапазон на честотна пренастройка** ($f_{min} - f_{max}$); типично 0.01–2.6 GHz; 0.05–20 GHz; 0.05–40 GHz; с външно умножение до 110 GHz (над 110 GHz се произвеждат по заявка).
- ❖ **Диапазон на пренастройка на изходната мощност** ($P_{min} - P_{max}$); типично до +16 dBm (40 mW);
- ❖ **Неточност на установяване на даден параметър:** $\pm \Delta f/f$; $\pm \Delta P/P$ (в зависимост от типа на генератора);
- ❖ **Нестабилност при установяване на даден параметър:** $\pm \delta f/f$; $\pm \delta P/P$ (зависи от околната температура, други външни условия, от съгласуването и постоянството на товара и пр.)

Сигнал-генератори

Сигнал-генераторите са най-ранният тип измерителни генератори в микровълновия обхват. И днес те са единственият тип генератори над 110 GHz и в THz обхват. Отначало включват аналогов генератор (клистрон, лампа с обратна вълна ЛОВ, Гън-диоден генератор, VCO и др.) с аналогово управление. Днес ролята на сигнал-генератори в dm, cm и mm обхвати се изпълнява от честотни синтезатори с цифрово управление.

По-долу е представена типична схема на аналогов сигнал-генератор с кратко описание на отделните му части:



Принципна схема на аналогов микровълнов сигнал-генератор

- **Базов генератор:** управляеми микровълнови осцилатори: транзисторни (VCO, YIGCO), лампи (клистроци, ЛОВ), умножители, честотни синтезатори
- **Електронна** (чрез напрежение – VCO или чрез ток – YIGCO) или **механична пренастройка** на честотата (желателно линейна).
- **Буферен широколентов развързващ усилвател;** използва за развързка и допълнително съгласуване на изхода независимо от включения товар;
- Управляем **изходен атенюатор** за плавно или стъпално регулиране на нивото;
- **Автоматично стабилизиране** на нивото чрез обратна връзка (feed-forward, feed-backward)
- Модулация на изходния сигнал (CW, AM, FM или модерни комуникационни модуляции)

Пример: сигнал-генератори (източник www.agilent.com)

Product	Frequency Range	Modulation Types	Application
RF and Microwave Source Accessories		Same as source driver	Microwave frequency extension up to 110 GHz, RF & Microwave amplifiers
Baseband Studio	N/A	Any arbitrary waveform	Fading, long waveform streaming, and digital outputs
Vector Signal Generators	250 kHz to 20 GHz	MSK, FSK, QAM, PSK, custom, AM, FM, phase modulation, pulse	W-CDMA, cdma2000, 1xEV, TD-SCDMA, CDMA, GSM, EDGE, 802.11 WLAN, Bluetooth, GPS, Multi-tone, Pulse building
Analog Signal Generators	250 kHz to 50 GHz	AM, FM, phase modulation, pulse	Sensitivity, adjacent channel, and intermodulation tests, radar and phase noise measurements
CW Signal Generators	250 kHz to 50 GHz	Continuous wave only	Local oscillator substitution, analog (ramp) sweep for stimulus response test

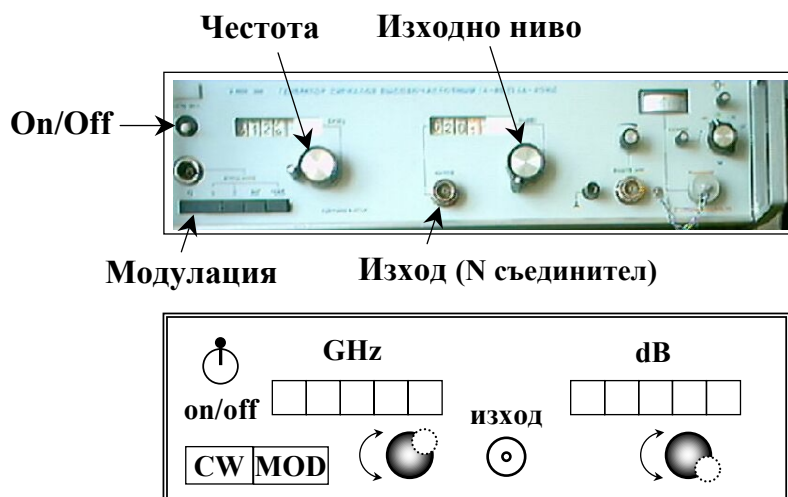


Типичен съвременен микровълнов сигнал-генератор

Много фирми предлагат сигнал-генератори в микровълновия обхват – Agilent, Anritzu (www.eu.anritsu.com) и др. (примерът е от сайта на Agilent).

Тези устройства имат следните типични характеристики: Диапазон на честотна пренастройка – зависи от типа на използвания базов осцилатор + евентуално външно умножение; неточност $\Delta f \sim \pm 1$ MHz в X обхват; нестабилност $\delta f/f \sim \pm 5 \cdot 10^{-5}$ (при синтезаторите – до $\pm 5 \cdot 10^{-9}$); изходна мощност типично $\sim -25 \div 0$ dBm (max +16 dBm) (за специални цели има и по-мощни генератори); неточност на установяване на мощността $\pm \Delta P$ – от тази на изходния атенюатор ± 0.1 dB; 50-омен изход.

Пример: по-стари аналогови сигнал-генератори



Външен вид на аналогов генератор от серия Г4-xx (Русия)

Стилизирано изображение с основните елементи на управление и модулация

Това са по-стари, но достатъчно надеждни източници на микровълнов сигнал. Използват различни типове осцилатори, работещи в относително тесни честотни ленти – клистрони, Гън-диодни осцилатори, лампи с обратна вълна. Имат тясна честотна лента на механична пренастройка: 20–30 % (поне десетина генератора покриват обхвата от 0.5 до 110 GHz), точност на пренастройката под ± 1 MHz; изходна мощност до 5-10 mW; външен механично управляем атенюатор с диапазон над 80 dB, точност на пренастройката 0.1 dB; непрекъсната генерация (CW) и модулация AM тип “меандър” с честота 1 kHz. Има и възможност за честотна FM модулация, но в тясна честотна лента под 100 MHz.

Линейно-пренастройваеми (sweep) генератори

Скалярни анализатори на вериги (SNA)



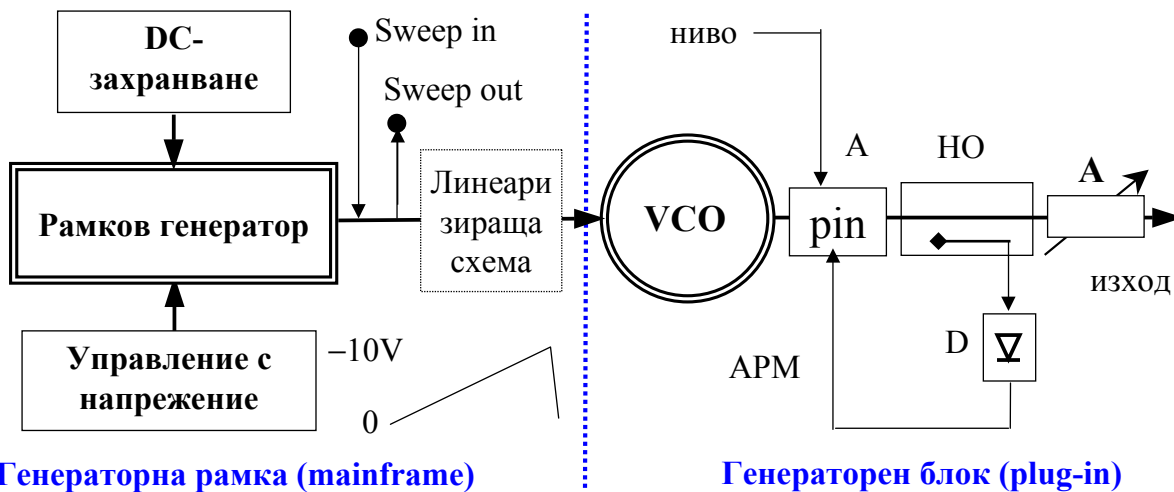
Векторни анализатори на вериги (VNA)



Линейно-пренастройваемите (sweep) генератори изработват микровълнов сигнал с линейно-изменяща се във времето честота, който се повтаря периодично с честотата на развивката на дисплея (управляващото напрежение). Тези генератори днес са много популярни, защото са в основата на анализаторите на вериги NA – най-разпространените измерителни системи за бързо, едновременно и точно измерване на пълният комплект S-параметри на устройствата в широк честотен обхват. Анализаторите на вериги са от скаларен тип ни (за измерване само на амплитудите на S-параметрите) и векторни (за амплитудите и фазите на S-параметрите). Анализаторите включват следните блокове:

- 1) Източници с линейно изменяща се честота (VCO, YIGCO, честотни синтезатори);
- 2) Устройства за разделяне на сигналите (насочени отклонители, мостове);
- 3) Устройства за детекция на сигналите (детектори, смесители)
- 4) Устройства за обработка на детектираните сигнали или на междинна честота; възпроизвеждане на данните (дисплей) и запис на информацията

Ранни аналогови генератори за скаларни анализатори



❖ **Генераторна рамка (mainframe):** Основни функции: контрол и управление на изходния сигнал, изработване на управляващо напрежение (тригонообразен импулс $0 \div -10\text{ V}$); линеаризиране на честотната модулация (не е задължително, ако FM блокът е линеен; амплитудна модулация тип “меандър” с цел по-добро и чувствително детектиране, blank импулси – начало и край на свипирането, изработване на честотни маркери и пр.;

❖ **Генераторен блок (plug-in):** Генерация на изходния микровълнов сигнал с от VCO, управляван от напрежението на генераторната рамка; филтрация на сигнала; определяне и регулиране на изходното ниво, стабилизация на нивото и пр.

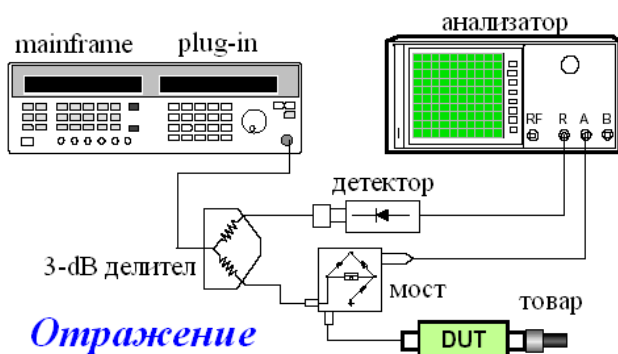
Традиционен скаларен анализатор на вериги (hp8757D)



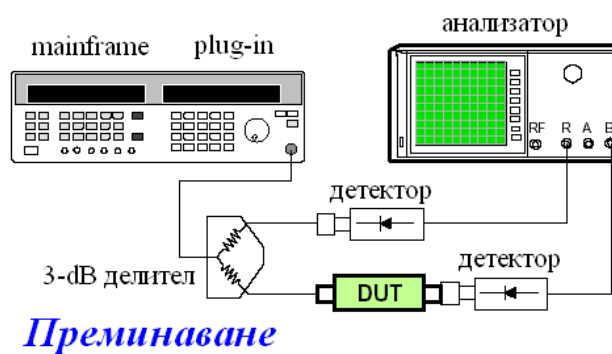
mainframe plug-in

Типични характеристики на подобни устройства: диапазон на честотна пренастройка – определя се от диапазона на plug-in блока (вж. следващите две страници); неточност $\Delta f \sim \pm 5\text{ MHz}$ в X обхвата (по-голяма от тази на сигнал-генераторите); линейност на пренастройката $\pm 8\text{ MHz}$ в X обхват; температурна нестабилност по-добра от $\delta f \sim \pm 0.5\text{ MHz}/^\circ\text{C}$; изходна мощност както при сигнал-генераторите, типично $-25 \div 0\text{ dBm}$ (max +16 dBm); 50-Ω изход (N, SMA).

Традиционните скаларни анализатори практически вече не се произвеждат, но дават добри предимства при приложения, които изискват системата да е евтина и надеждна. Те се нуждаят и от доста допълнителни външни аксесоари: делители, насочени отклонители, мостове, детектори и др. Схемите долу илюстрират двата най-използвани начина на свързване.

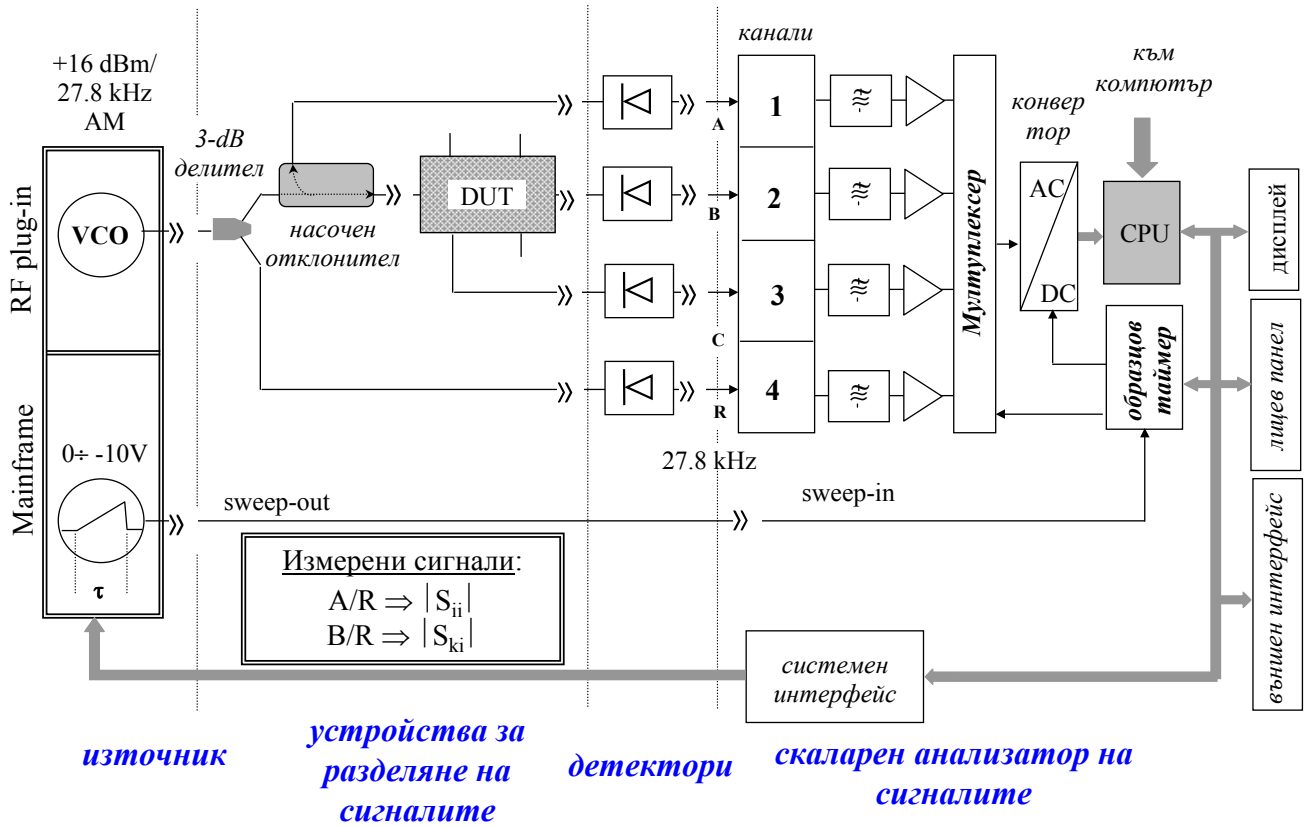


Отражение

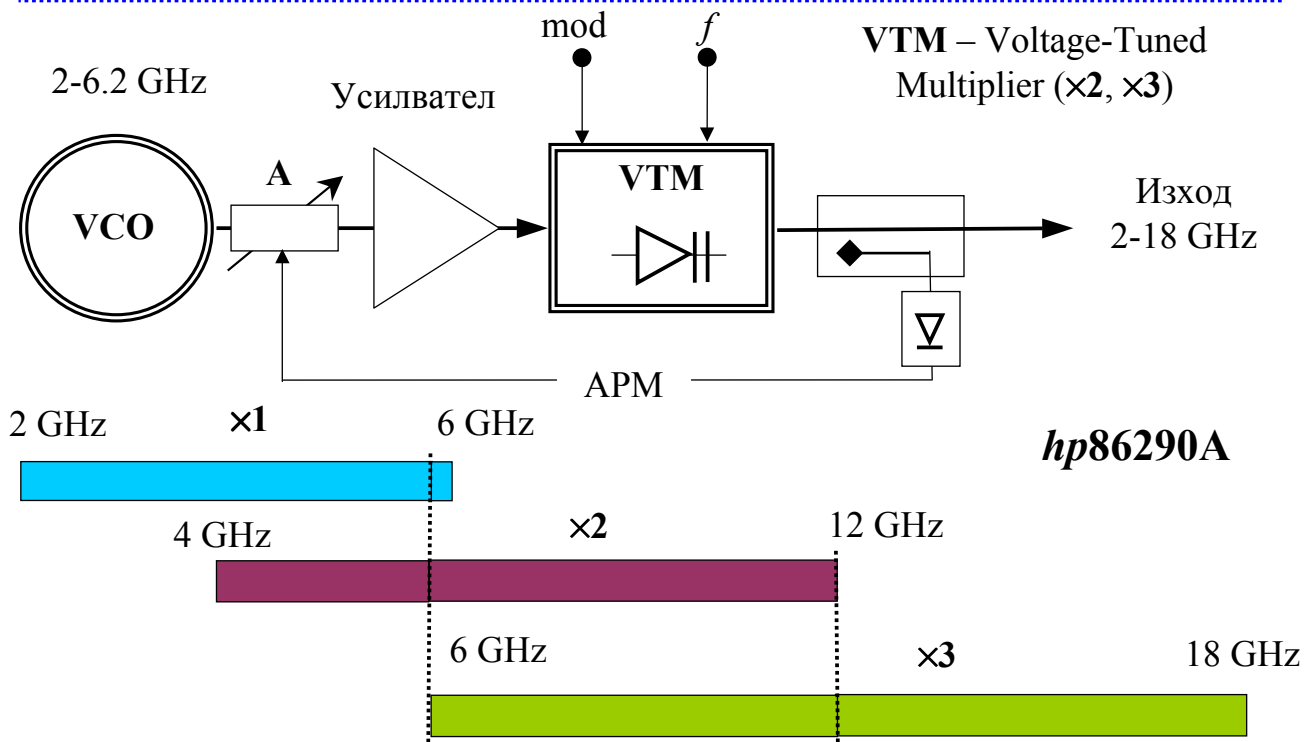


Преминване

Пример: Принципна схема на скаларен анализатор на вериги *hp8757B*



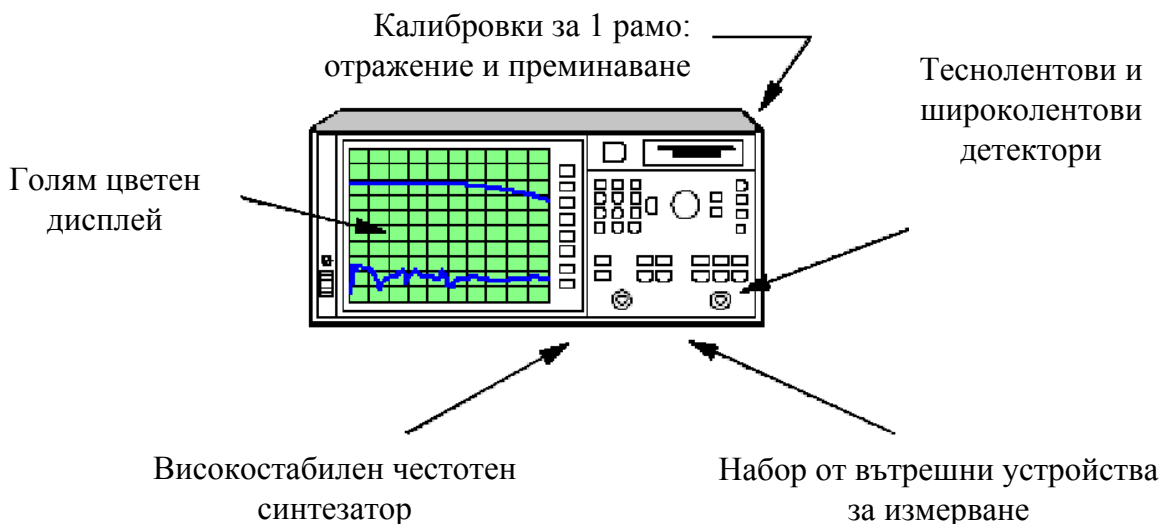
Пример: Широколентов аналогов източник (2 - 18 GHz)



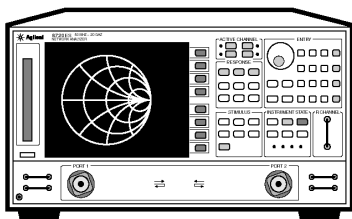
Първите plug-in блокове са разработени да покриват отделни тесни честотни обхвати, което определено е неудобство при измерването (смяна на блокове). Широколентовите аналогови sweeper източници се реализират чрез управляеми умножители (VTM). Горепосочен пример за скаларен анализатор 2-18 GHz с VTM с коефициент $\times 2$ и $\times 3$ за обхвата 6-18 GHz.

Съвременен скаларен анализатор на вериги (всички блокове – в едно устройство)

Съвременните скаларни анализатори се изграждат на друг принцип. При тях (както и при векторните NA) всички компоненти, необходими за измерването на коефициентите на отражение и преминаване са вградени в един инструмент: стабилизирани източник (честотен синтезатор), устройства за разпределяне на сигнала и голям дисплей. По това модерните SNA приличат на VNA, като освен това имат теснолентово детектиране и векторна корекция чрез калибровката. Така SNA днес приличат на VNA по динамичен обхват и висока точност на измерването с една разлика – измерват само амплитудите на сигналите.



Генератори за векторни анализатори на вериги



Както отбелязахме, архитектурата на съвременните VNA е проектирана така, че всички важни измерителни устройства са събрани в един блок. Това са трите главни части на векторния анализатор: 1) генератор, който обикновено е управляем високостабилен синтезатор на честота; 2) векторен анализатор за обработка на сигналите на междинна честота и 3) микровълнов мост с две рамена 1 и 2 за измерване на двураменни устройства

Microwave



Agilent 8720D family

- 40 GHz
- economical
- fast, small
- test mixers, high-power amps
- S-parameter



Agilent 8510C family

- 110 GHz
- pulse system
- antenna meas.
- Tx/Rx module test
- highest accuracy
- 4 S-param. display

RF



Agilent 8712/14C

- 3 GHz
- low-cost, fast
- narrow-band and broadband detection
- T/R test set only



Agilent 8753D family

- 6 GHz
- 52C: T/R test set
- 52D: S-parameter
- highest RF accuracy
- Offset and harmonic RF sweeps

Пример: Комерсиални векторни анализатори на вериги
(източник www.agilent.com)

UHF



Agilent E5100A/B

- 300 MHz
- economical
- fast, small
- test resonator, filters
- parameter



Agilent 8751A

- 500 MHz
- fast list sweep
- impedance matching
- 4 trace display

NA&SA



Agilent 4195A

- 500 MHz
- network/spectrum/impedance (optional) analyzer
- DC output
- user-defined functions

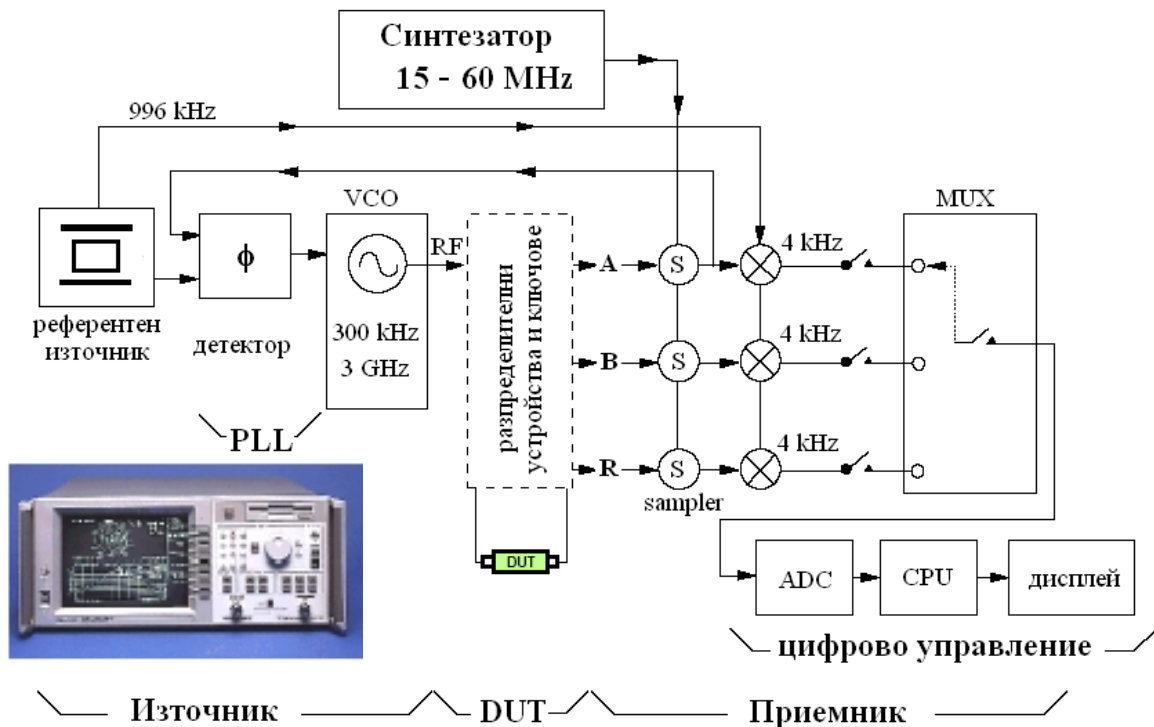


Agilent 4396A

- 1.8 GHz
- network/spectrum/impedance (optional) analyzer
- fast, highest accuracy
- time-gated spectrum (optional)

На тази и предишната страница са показани примери за векторни анализатори на вериги на фирмата Agilent® (бивш HP) в различни честотни обхвати: микровълнов (опции 40 и 110 GHz), RF (опции 3 и 6 GHz); UHF (опции 300 и 500 MHz) и комбинирани прибори – анализатори на вериги и спектроанализатори (опции 500 MHz и 1.8 GHz)

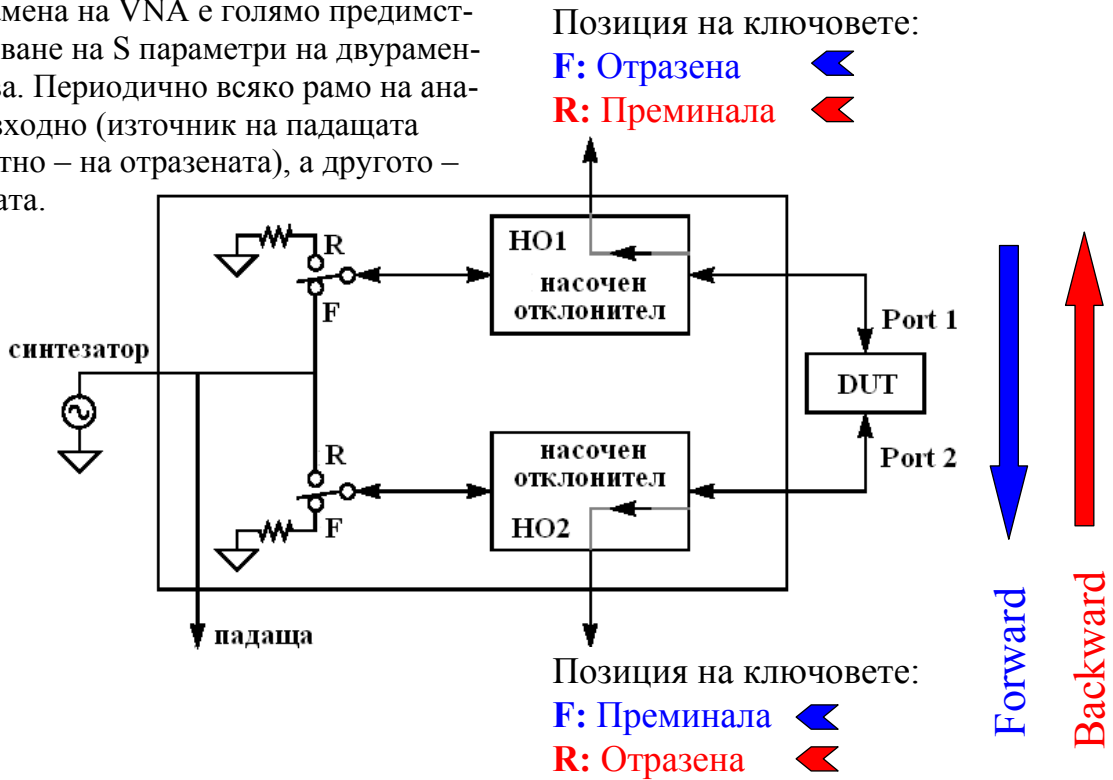
Пример: Принципна схема на VNA Agilent (hp) 8712/14C
(измерването на амплитудата и фазата става на ниски честоти)



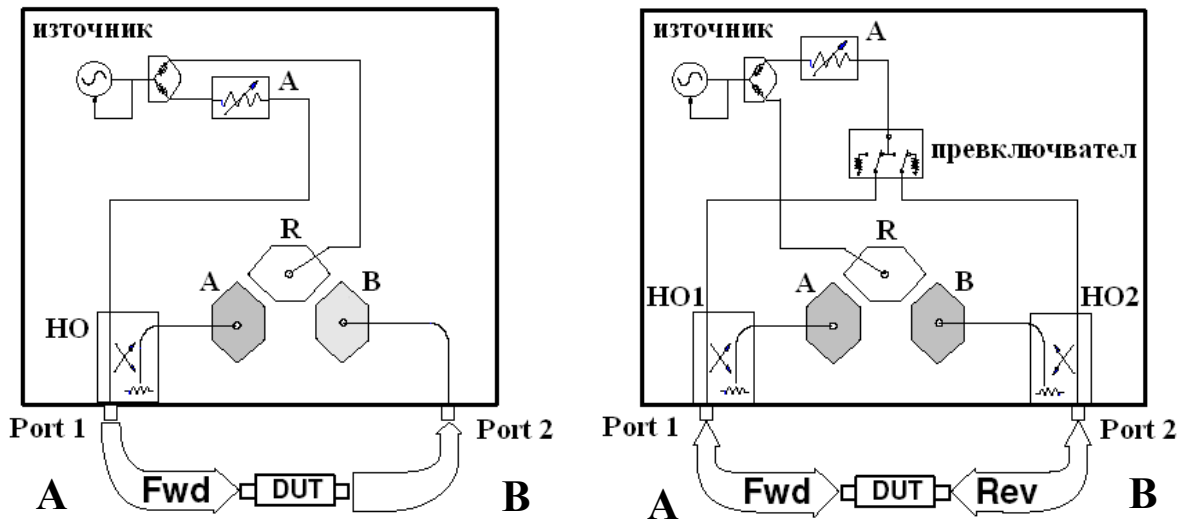
От показаната примерна блокова схема ясно се вижда, че обработката на сигнала за получаване на информация за амплитудата и фазата на S параметрите става на ниска честота (4 kHz), а не на честотата на сигнала от източника (300 kHz – 3 GHz).

Принципна схема на алтернативна смяна на измерителните рамена на векторен анализатор на вериги

Възможността за алтернативна смяна на измерителните рамена на VNA е голямо предимство при измерване на S параметри на двураменни устройства. Периодично всяко рамо на анализатора е изходно (източник на падащата вълна и обратно – на отразената), а другото – на преминалата.



Два подхода при измерване на устройствата с векторен анализатор на вериги с един източник



Измерване на преминал/отразен сигнал

Измерване на S параметри

Възможността да се управлява кое от рамената да е входно и възможността за алтернативната им смяна, придава по-голяма гъвкавост при панорамно измерване на устройствата с VNA. На фигурите горе са показани двата възможни подхода при измерване на двураменни устройства: 1) класически подход: устройството има фиксиран вход и изход и се измерват неговите коефициенти на отражение и преминаване; 2) измерване на пълен комплект S-параметри без да се сменят физически местата на рамената на устройството.

Честотни синтезатори

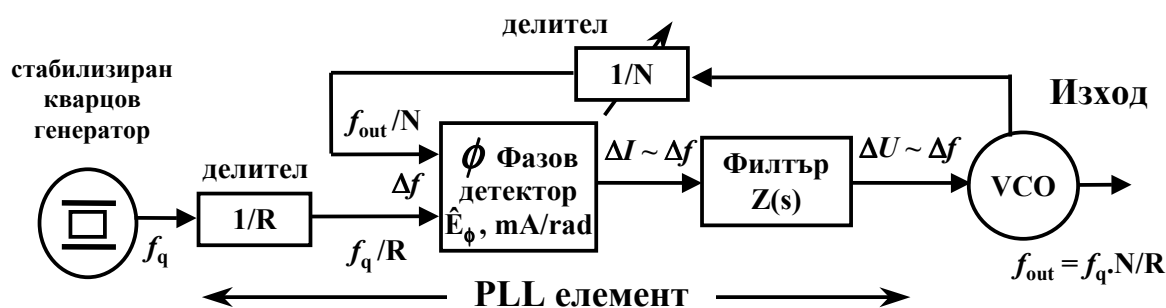
Честотните синтезатори са съвременните цифрово-управляеми източници на сигнали в микровълновата техника и в комуникациите. Основен недостатък на обикновените аналогови (VCO) източници ниската честотна стабилност на сигнала ($\sim 10^{-5}$, 10^{-6}), която днес е недостатъчна за измерителни цели.

Този проблем се решава при честотните синтезатори. Това са източници със стабилна честота, стабилна изходна мощност, възможност за стъпаловидно изменение на честотата и изходната мощност с определена стъпка, която може да се избира (а не плавно, както е при аналоговите управляеми с напрежение или ток източници).

Основната идея при реализация на честотните синтезатори е непрекъснато сравнение на изходната висока честота с тази на високо-стабилизиран нискочестотен референтен източник (кварцов генератор) f_q (т. нар. “индиректен синтез” на сигнал). Така лесно се постига 24-часова времева стабилност до $\delta f/f_q \sim 10^{-9}$, която е значително по-добра от тази на обикновения VCO-източник.

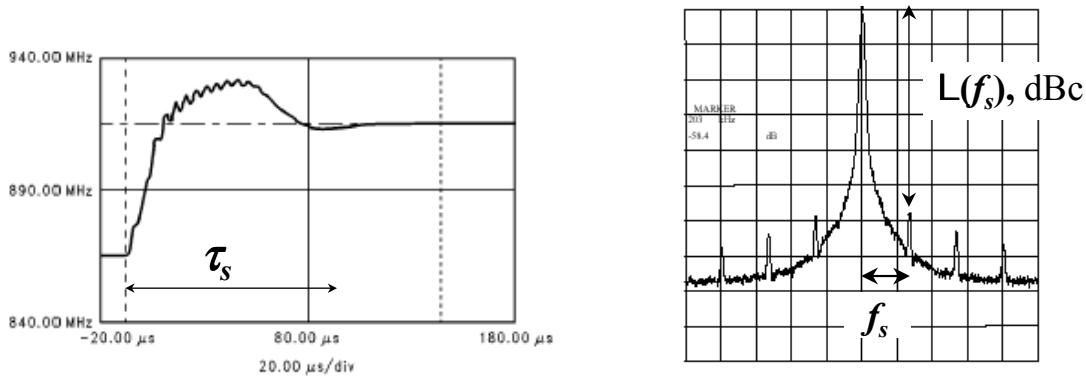


Принципна схема на честотен синтезатор на основата на PLL



Идеята на PLL-елемента е непрекъснатото сравняване на изходната честота f_{out} с опорната честота f_q стабилизирания кварцов генератор във фазово-честотен детектор и корекция на честотата на VCO-източника, ако тя се е изменила. Понеже $f_{out} \gg f_q$, сравнението става на по-ниска честота, като се използват два делителя на честота: основен делител с коефициент N за f_{out} и допълнителен делител с коефициент R за f_q (N и R са обикновени цели числа и $N \gg R$). Двата сигнала с близки честоти f_{out}/N и f_q/R се подават на входовете на фазовия детектор, на чиито изход се появява сигнал (dc-ток), пропорционален на разликата в честотите на входовете. Така, ако по някаква причина изходната честота f_{out} се е изменила, на входа на детектора се появява честотна разлика Δf , а на изхода – dc-ток $\Delta I \sim \pm \Delta f$, чиято посока зависи от знака на честотната промяна. Добре проектиран нискочестотен филтър с импеданс $Z(s)$ преобразува този ток в пад на напрежение на изхода $\Delta U \sim \pm \Delta f$. Това е управляващ сигнал за корекция на честотата на VCO-източника с такава големина, с която се възстановява стабилната стойност на $f_{out} = f_q \cdot N/R$

Стъпка на настройка и фазов шум при честотните синтезатори



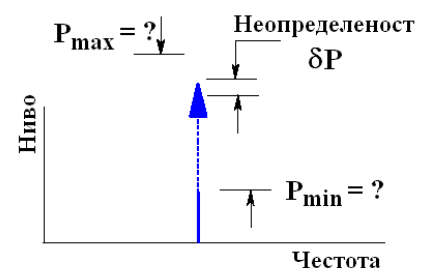
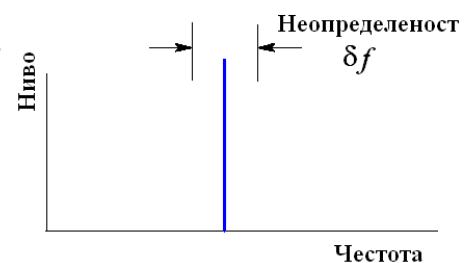
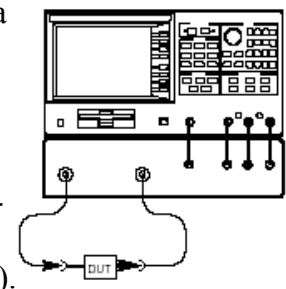
Честотата на изходния сигнал на синтезатора $f_{out} = f_q \cdot N/R$ може да се изменя, като най-често се използва променлив (стъпка ± 1) коефициент на делене N на основния делител. Така честотният синтезатор генерира мрежа от дискретни честоти със стъпка $f_q/R \ll f_{out}$. С други думи, синтезаторът представлява изключително стабилен генератор на високо-честотен сигнал, чиято честота може да се изменя с малка стъпка за кратко време. Честотните синтезатори днес да са предпочитани цифрово-управляеми източници в много приложения, включително и като сигнал- или sweeper-генератори за измерителни цели, в мобилните комуникации, където е определяща е честотната стабилност и бързото превключване на честотата на сигнала при търсене на канал за връзка или в режим на превключване на носещата (frequency hopping). При тези приложения са важни два параметъра: малки времена τ_s за превключване на честотата и нисък фазов шум $L(f_s)$, dBc, който се определя от спектралната чистота на сигнала на изхода (вж. и Лекция 6).

Спецификация на синтезаторите за измерителни цели

За да се използва даден синтезатор като измерителен генератор, трябва да се определят неговите спецификации. За CW източници те се делят на 3 категории: честота, амплитуда и спектрална чистота (вж. следващата страница). Към честотните спецификации са обхвата на източника, разделителната способност (при синтезатори това е минималната стъпка на изменение на честотата) и точността на установяване на честотата δf . Последната зависи от "стареенето" τ_{aging} на референтния осцилатор и от времето, изминало от последната калибровка ($t_{cal} = 1$ год.).

Има проста формула за оценка на δf : $\delta f = f_0 \cdot \tau_{aging} \cdot t_{cal}$. За добър кварцов осцилатор $\tau_{aging} \sim 0.152$ ppm/година. Това е честотният дрейф на референтния осцилатор в периода между две калибровки. Например: ако $f_0 = 1$ GHz, то $\delta f = 152$ Hz, т.е. неопределеността на честотата е под 0.00002 %.

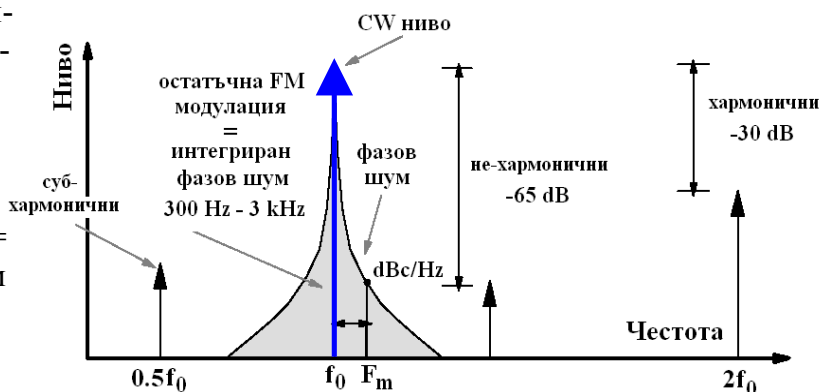
Основните амплитудни спецификации (за изходното ниво) се отнасят до обхвата (от P_{min} до P_{max} ; типично от -136 dBm до +13 dBm), разделителната способност (това е минималната стъпка на превключване на нивото, обикновено ~ 0.02 dB), неопределеност на установяване на нивото (± 0.5 dB; зависи от нестабилността на системата за автоматичен контрол на нивото), скорост на превключване на нивото (~ 25 ms) и защита (изолацията) спрямо върнат (обратен) сигнал. Последната спецификация е много важна, понеже при разсъгласун товар или при измерване на предаватели, върнатият сигнал може да повреди източника.



Фазов шум и спектрална чистота на измерителните синтезатори

Спецификацията за спектрална чистота са важни за не-идеалните източници. Спектърът на идеален CW източник на синусоидален сигнал съдържа една спектрална компонента f_0 . Неидеалните нелинейни източници “произвеждат” фазов шум и нежелани спектрални съставки (вж. фигурата). Последните са от два типа – хармонични (и суб-хармонични) и не-хармонични. Хармоничните са с честоти, равни на произведението на основната CW честота с цяло число. Нелинейните характеристики на крайните усилватели в източника пораждат типично втора, трета и по-рядко по-висши хармонични. Нивото на най-силната от тях трябва да е на -30 dB под нивото на основния сигнал. Когато в източника се използват умножители, те пораждат и суб-хармонични – паразитни сигнали с честоти, кратни на основната. Не-хармоничните се пораждат от различни източници (напр. от пулсации на захранващото напрежение) и типично са с много ниско ниво (под -65 dB).

Фазовият шум има по-различен физичен произход (вж. и Лекция 6). За разлика от идеалния случай случайните шумови сигнали с честоти, близки до основната, предизвикват разширяна спектралната линия. Математически този процес се моделира като случайна фазова/честотна модулация. Фазовият шум се измерва чрез спектроанализатор в dBc/Hz на честота F_m от носещата. Пример: -97 dBc/Hz@ 100 kHz, $f_0 = 20$ GHz. Изисква се фазовият шум на измерителния генератор да е с поне -10 dB по-малък от този на всяко измервано устройство.



Пример: векторен анализатор на вериги (Agilent 8720E)



Agilent Technologies
Innovating the HP Way

8719ET vector network analyzer,
50 MHz to 13.5 GHz

8720ET vector network analyzer,
50 MHz to 20 GHz

8722ET vector network analyzer,
50 MHz to 40 GHz

Както бе подчертано, основни предимства на честотните синтезатори са изключително висока честотна стабилност (до $\Delta f/f_q \sim 10^{-9}$ /денонощие) и нисък фазов шум при високо изходно ниво. Типичните характеристики на показаното устройство са: диапазон на честотна пренастройка: 10 MHz – 110 GHz; стъпка на пренастройка: 1 kHz – 1 GHz (типично ~ 10 kHz в X обхват и ~ 100 kHz в mm обхват); време за превключване (step response): < 20 ms /10 Hz (по-бързо превключване е възможно при понижена точност); изходна мощност: от -136 dBm до $+13$ dBm; вградени атенюатори. Сърцето на синтезатора е референтния източник. Той трябва да е изключително стабилен, пренастройваем в тясна лента около f_q и не много скъп. Ежегодно подлежи на калибровка с честотен стандарт. Обикновено референтният източник е температурно-компенсиран кварцов осцилатор (ТСХО), работещ при стайна температура. Има и осцилатори в термостати (ОСХО). Те имат различно “стареене”: $\tau_{aging} \sim 2$ ppm/година за ТСХО и $\tau_{aging} \sim 0.1$ ppm/година за ОСХО. Фазовият шум на измерителните синтезатори се наслагва върху фундаменталния шум от страна на референтния осцилатор и VCO (спада както $1/f^3$) и от фазовия детектор (спада както $1/f^2$). Допълнително, деленето на изходния сигнал в PLL елемента ($1/N$) увеличава фазовия шум с $20 \log N$.

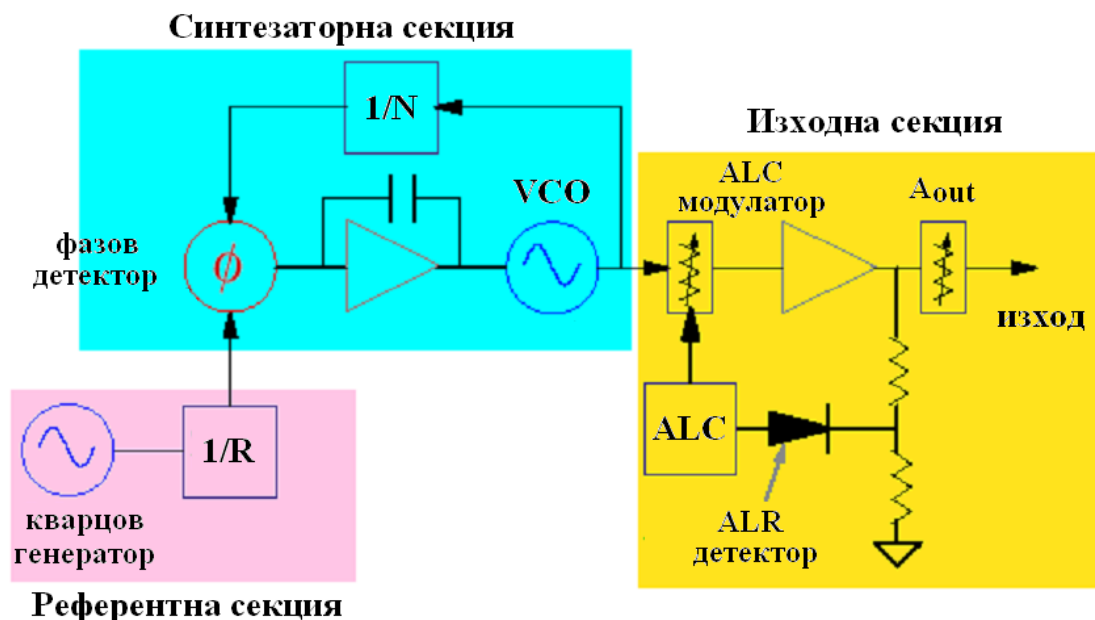
Използване на синтезаторите в измерителните системи

Всеки източник, който се базира на честотен синтезатор, има в състава си три отделни, но свързани помежду си части, всяка с различни функции и предназначение. Това са: 1) референтната секция (отговорна за честотната стабилност); 2) синтезаторната секция (отговорна за генерацията на сигнала и спектъра му) и 3) изходната секция (отговорна за изходните настройки на източника по ниво).



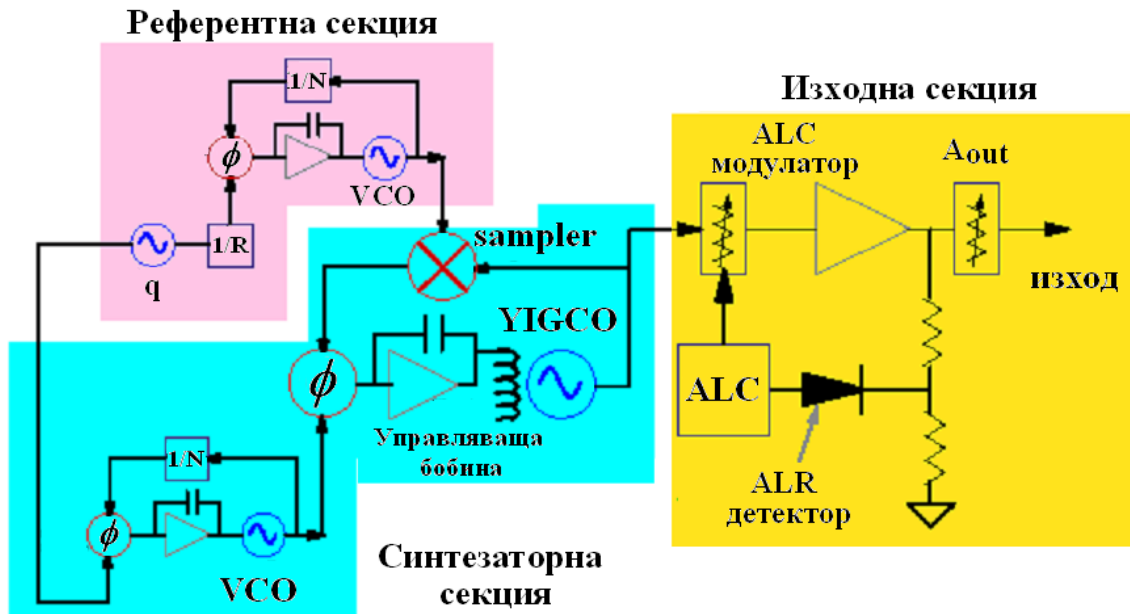
Използване на синтезаторите за сигнал генератори

Първият пример се отнася до използване на честотен синтезатор като сигнал-генератор за CW сигнал (за модулирани сигнали – вж. по-нататък). Дадена е силно опростена блокова структура на отделните секции. Това е класически PLL синтезатор: източник е VCO, чиято честота се стабилизира с референтния генератор, а честота му се управлява с пренастройваема стъпка $N/R \times f_q$. Изходната секция има управляем модулатор/атенюатор/усилвател за автоматична регулировка на мощността (ALC) и изходен механичен или електронноуправляем атенюатор ($-136\text{dBm} \div +13\text{dBm}$).



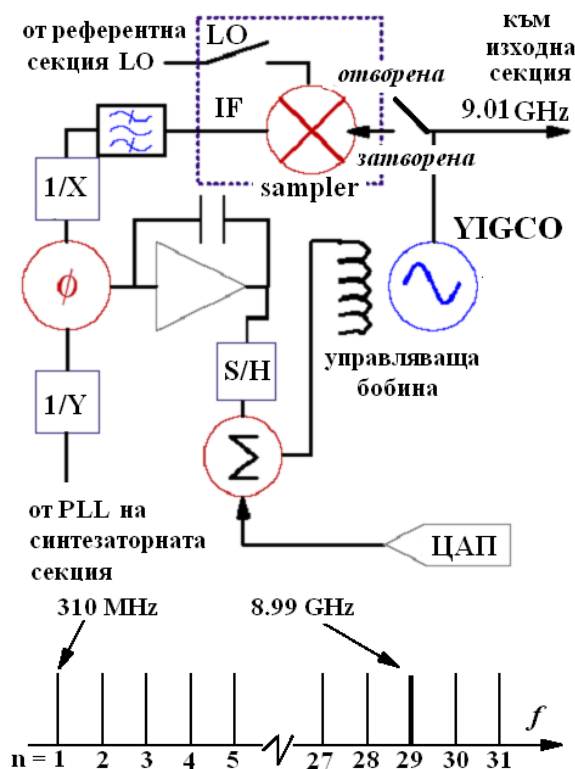
Използване на синтезаторите в sweep генератори

Вторият пример е за използване на честотен синтезатор като sweep генератор. Структурата е подобна на предишната, но има и разлики. Референтната секция тук е комбинация от референтната и синтезаторната секция от предишния пример и произвежда два сигнала, които се подават на новата синтезаторна секция. Изходният сигнал се произвежда от YIG (Yttrium-Iron-Garnet) осцилатор, който се управлява от магнитното поле на управляваща бобина (вж. и следващата страница). Трета разлика е, че вместо 1/N-делител, честотата на изходния сигнал се намалява в синтезаторната секция с хармонично смесване (sampling).



YIG осцилатор в sweep синтезаторите

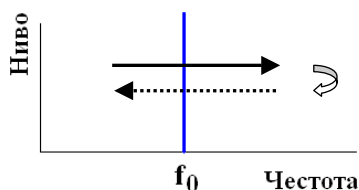
YIG осцилаторът (YIGCO) е в основата на синтезатора с пренастройваема честота (sweep синтезатор). YIGCO има много широка лента на линейна честотна пренастройка с ток на управляваща бобина и много нисък фазов шум, но е честотно нестабилен без PLL елемент.



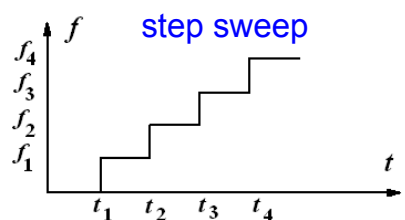
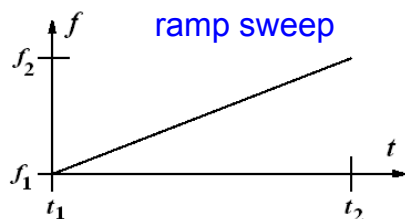
Как работи? Част от изходния сигнал се подава на смесителя, чиято LO честота се поддържа от референтната секция от нейното VCO, стабилизирано с отделен PLL. Смесването на сигнала от YIGCO всъщност става с хармоничните на LO. IF сигналът се филтрира и честотата на получения сигнал е разликата на YIGCO сигнала и най-близката хармонична на LO. Пример: нека изходната честота е 9.01 GHz, LO – 310 MHz, а IF филтърът да пропуска само сигнали 18-26 MHz. Така YIGCO честотата ще се смеси с 29-та хармонична на LO (8.99 GHz), за да “произведе” IF сигнал 20 MHz. Смесването с 28-та и 30-та хармонична ще даде IF сигнали 330 и 290 MHz, които ще се “отрежат” от IF-филтъра. Така честотата на изходния сигнал се стабилизира около дадена хармонична на LO, увеличена с IF честотата. Изходният сигнал от YIGCO PLL може да се използва за бързо и точно управление на изходната честота с помощта на настройващата бобина (вж. следващата страница).

Пренастройка на изходната честота на sweep синтезаторите

Sweep синтезаторите имат същите блокове, както CW синтезаторите, но в добавка и допълнителен хардуер за управление на честотата. Както бе показано на предишната страница, честотата се изменя чрез управление на YIGCO чрез изменение на тока през специална бобина с отворена или затворена управляваща верига, включваща ЦАП, суматор и S/H блок



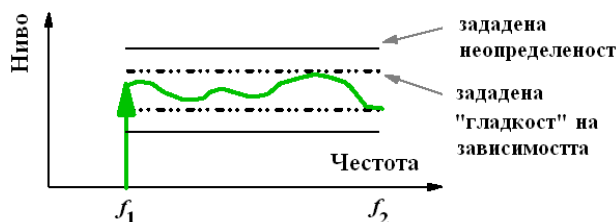
(Sample-and-Hold), който задава стартовата честота. Прецизното изменение на честотата изисква да се знае точно кривата на настройка на конкретния YIGCO. При отворена верига управлението е бързо, но неточно, а при затворена – точно, но бавно. Последното е така, понеже при затворена верига всяка честота се синтезира, за което трябва определено време (при отворена верига се синтезира само началната честота).



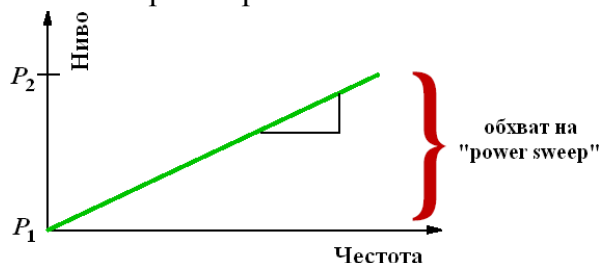
На графиките са показани двата възможни случая на честотен "sweep". Първият е "ramp sweep". Изходната честота се мени плавно (линейно) между фиксирани начална и крайна честоти (бързо, но по-неточно). При "step sweep" (по списък от честоти – от 2 до няколко хиляди точки) изходната честота се мени скокообразно между еквиливантни честоти, като във всяко честотно състояние синтезаторът се стабилизира (бавно, но точно). При "ramp sweep" се задава време за sweep и честотна резолюция, а при "step sweep" – брой на честотните точки и време за превключване. Всеки съвременен NA има и двете опции, които се ползват в зависимост от предназначението на измерването и зададените изисквания за точност.

Пренастройка на мощността на sweep синтезаторите

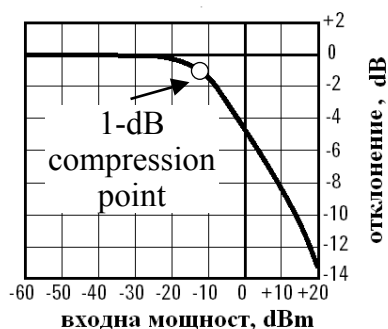
Освен пренастройка на изходната честота, съвременните източници в анализаторите на вериги позволяват контрол и "sweep" на изходното ниво. При изменение на честотата нивото се контролира в два аспекта: по зададена неопределеност и зададена "гладкост" на кривата на изходната мощност. Ако грешката при установяване на нивото е напр. ± 1 dB, то нееднородностите в честотната зависимост на нивото не трябва да надхвърлят ± 0.7 dB (вж.). Другата възможност е много важна – при фиксирана изходна честота на източника може плавно да се пренастройва неговата изходна мощност в зададен интервал $P_1 - P_2$. Скоростта на тази пренастройка се определя от времето за пре-



Граници на изменение на мощността при пренастройка на честотата

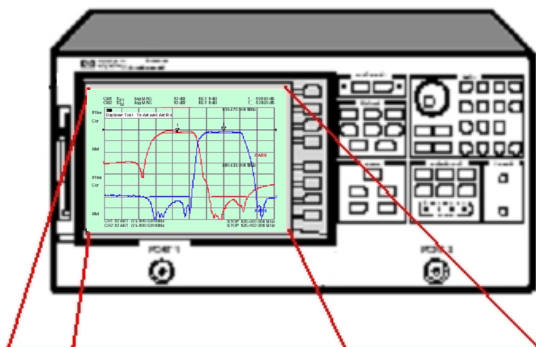


Граници на изменение на мощността при пренастройка на изходното ниво

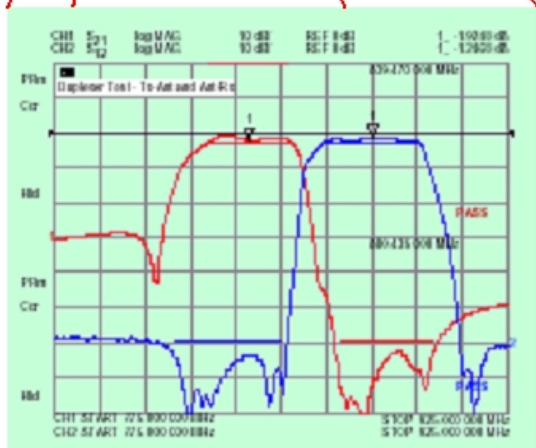


включване от едно на друго изходно ниво (наклон на кривата; power slope). Вместо наклон може да се зададе брой на изходните нива и време за "престой" на източника в дадено ниво. Опцията "power sweep" се използва за изследване на нелинейността на изходната характеристика на активни устройства (т.е., определяне на "точката на 1-dB компресия").

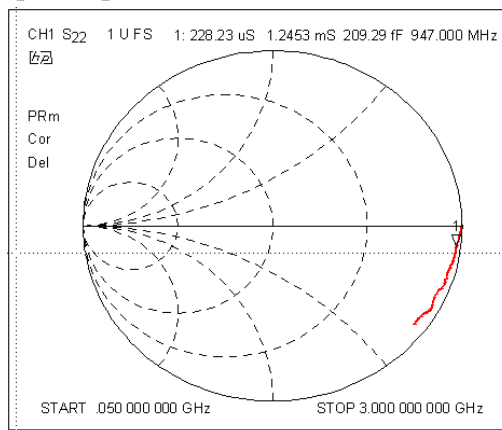
Представяне на измерените параметри на дисплей



Дисплеят е важен блок на съвременните NA. Това е устройството, където данните за отразените и преминалите сигнали се представят в разбираем формат, така че измерванията да могат да се интерпретират лесно. Много от съвременните NA имат опции за линеен и логаритмичен “sweep” по честота и ниво, съответно линейни и логаритмични формати за представяне на резултатите, полярни диаграми и диаграми на Смит и пр. Те имат още проследяващи маркери (честота, ниво), ограничителни линии, индикатори и др.

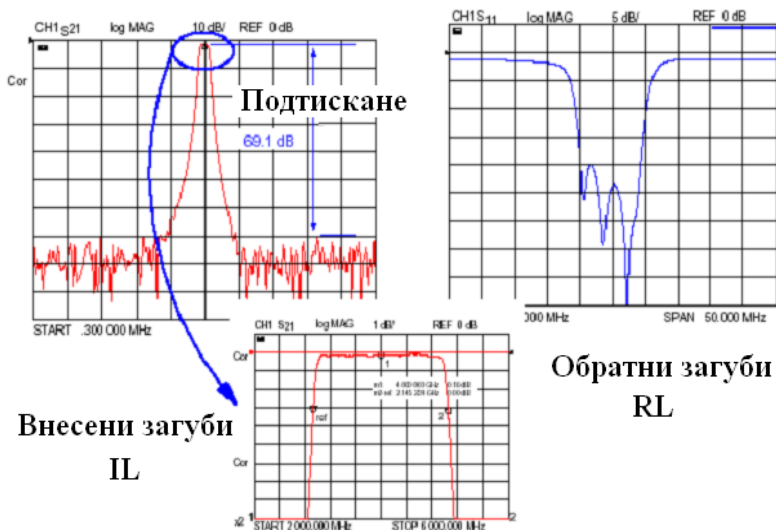


В декартова координатна система



В полярна диаграма (или диаграма на Смит)

Примери за измервания на устройства чрез пренастройка на честота и изходна мощност



Внесени загуби
IL

Подтискане
69.1 dB

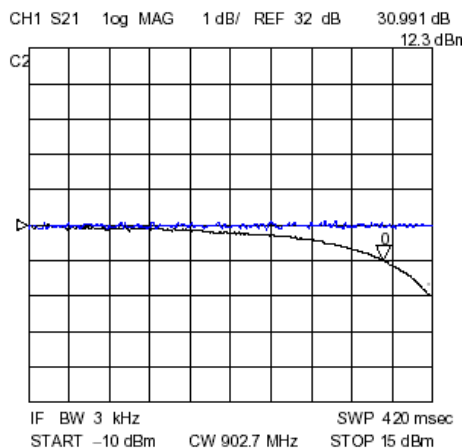
Обратни загуби
RL

Пример 2:

Определяне на точката на 1-dB компресия на усилвател чрез опция “power sweep”

Пример 1:

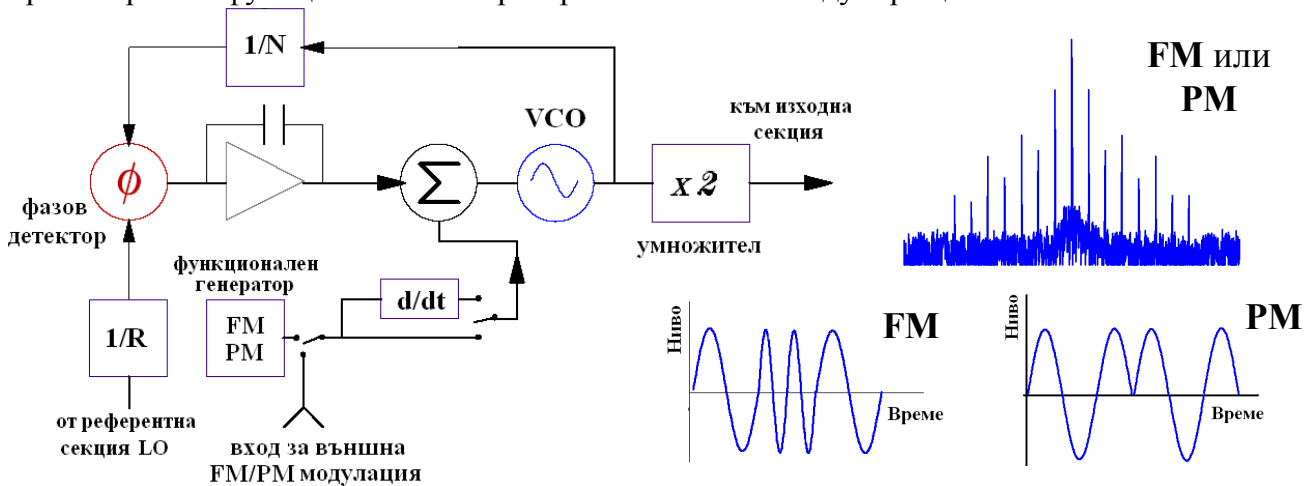
Честотно поведение на внесени и обратни загуби на лентово-пропускащ филтър и подтискане извън лентата на пропускане



Сигнал-генератори за модулирани сигнали (FM, PM)

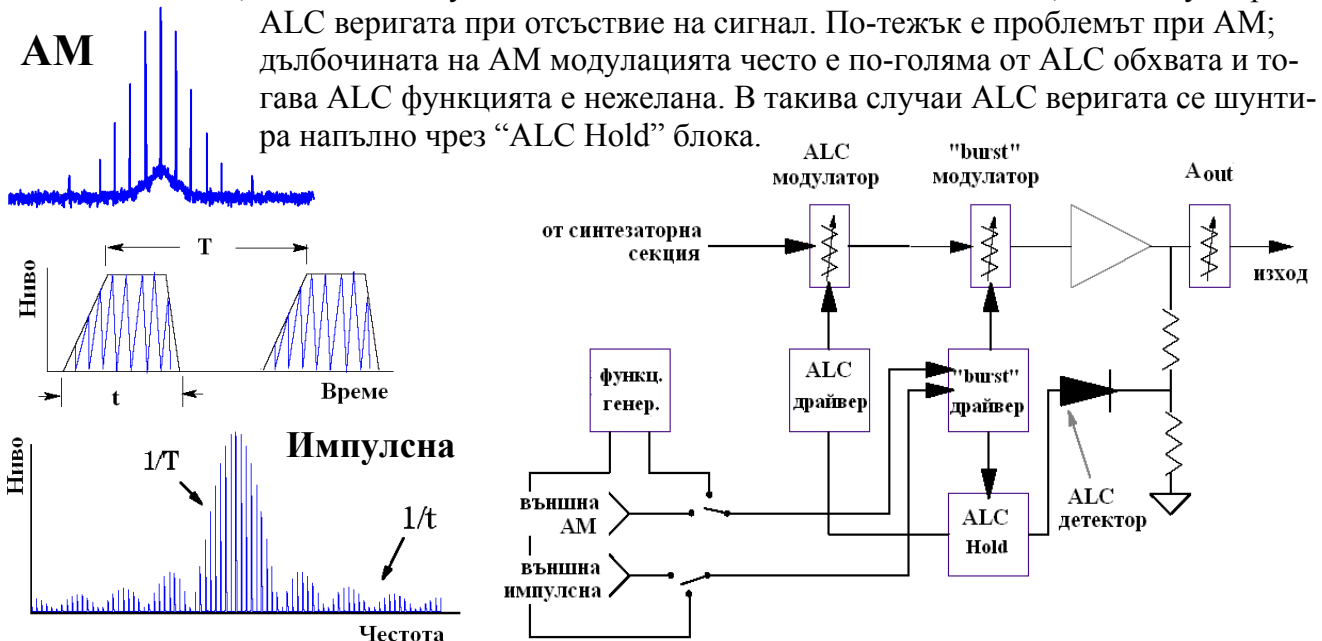
Освен за непрекъснат CW сигнал, съвременните микровълнови сигнал-генератори са източници на модулирани сигнали от всякакъв вид: аналогови модуляции, цифрови модуляции и други специфични формати, поддържани в различни комуникационни системи (повече за модуляциите в [xx]). Това са строго “калибрирани” модуляции, които имат точно определена спецификация. В следващите страници ще покажем принципно как се реализират най-важните типове аналогови и цифрови модуляции в микровълновите сигнал-генератори.

Първият пример се отнася до реализацията на аналогови ъглови модуляции (честотна FM и фазова PM). Това става директно в синтезаторната секция чрез управление на напрежението на VCO. Максималната честотната и фазовата девиация Δf и $\Delta \phi$ на FM и PM модуляциите се ограничават от честотната лента на PLL елемента. Модуляциите се реализират или чрез вътрешен функционален генератор или с външен модулиращ сигнал.



Сигнал-генератори за модулирани сигнали (AM, импулсна)

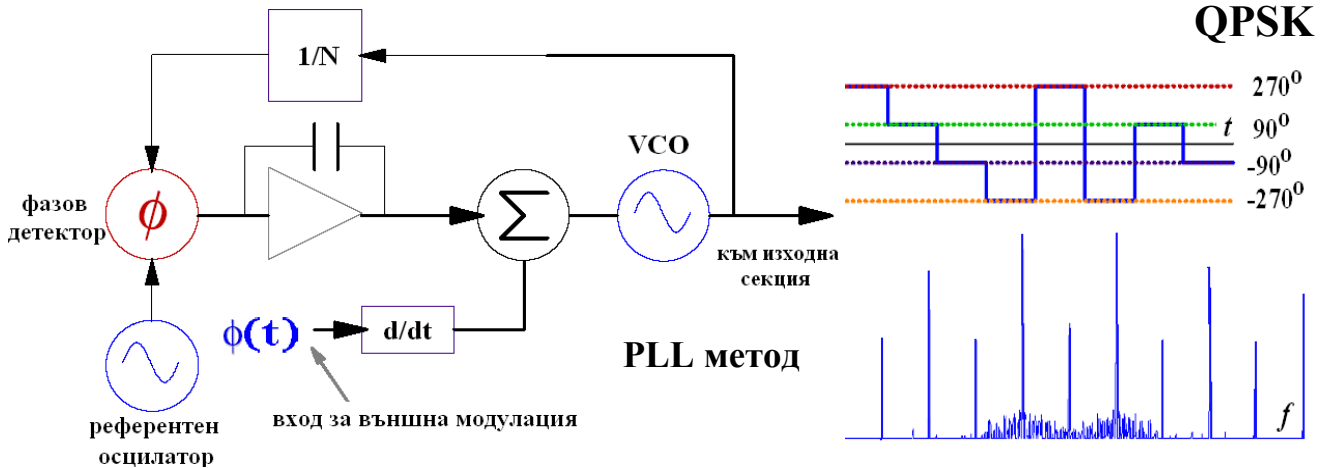
Вторият пример е за реализация на сигнал-генератор с аналогова амплитудна AM и импулсна модуляции. Сега управлението на процеса става в изходната секция, където “burst” модулатора/драйвера контролират изходното ниво във времето чрез променливи атенюатори. Ролята на ALC модулатора/драйвера се свеждат до поддържане на постоянна основна амплитуда, както при CW генератора, но сега двата процеса са в конфликт. Например, при импулсна модулация в off-състояние ALC веригата “добавя” липсващата микровълнова мощност към изхода, което е недопустимо. Затова се ползва блок “ALC Hold”, който шунтира ALC веригата при отсъствие на сигнал. По-тежък е проблемът при AM; дълбочината на AM модулацията често е по-голяма от ALC обхвата и тогава ALC функцията е нежелана. В такива случаи ALC веригата се шунтира напълно чрез “ALC Hold” блока.



Сигнал-генератори за цифрови модулирани сигнали (PLL метод)

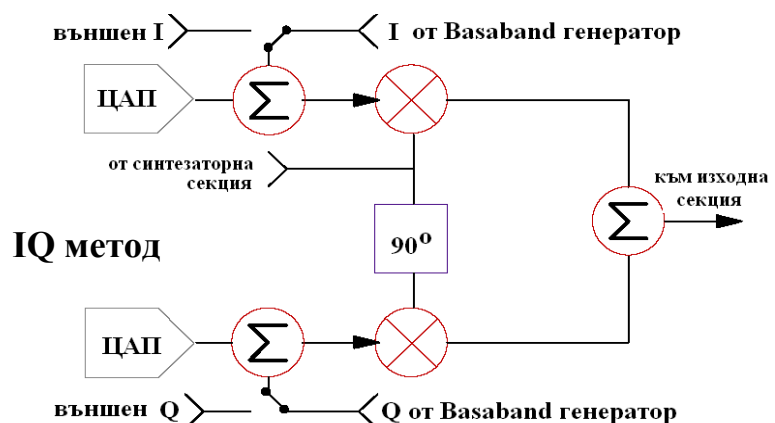
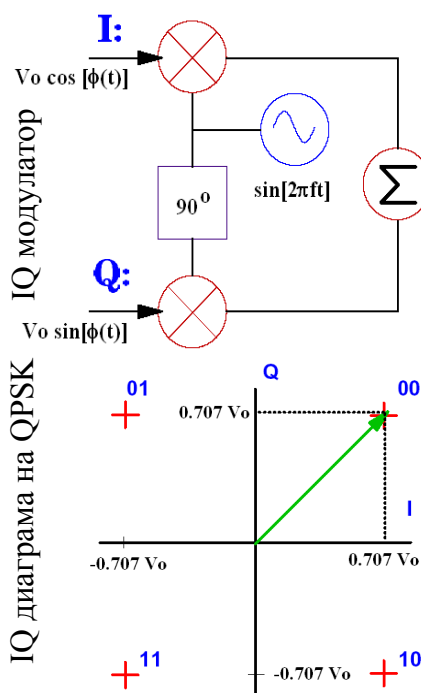
Съвременните модуляции са цифрови. Единствената им разлика с аналоговите е, че модулиращият сигнал може да има само две дискретни (min; max) стойности на амплитудата (отговарящи на битовете "0" и "1"), а преходите между тях са доста резки. Тук също се реализират амплитудна, честотна и фазова цифрови модуляции (ASK, FSK, PSK; SK – Shift Keying); на фигурата е даден пример за най-популярната QPSK модуляция.

Всички микровълнови сигнал-генератори поддържат цифрови модуляции, напр. QPSK. При директния PLL метод това става с външен цифров сигнал, който генерира 4 фазови състояния на VCO. Качеството на QPSK модуляцията се лимитира от динамичния обхват на синтезатора (ограничава битовата скорост; bit rate) и от точността на задаване на фазовите състояния, поради което директният PLL метод се ползва рядко.



Сигнал-генератори за цифрови модулирани сигнали (IQ метод)

Има по-ефективни цифрови модулиращи схеми. В случая на QPSK модуляция съществува т.нар. IQ-модулятор. Идеята е проста: на двата входа се подават еднакви по ниво модулиращи (base-band) сигнали, отместени на 90° (компоненти: I – in-phase; Q – quadrature). IQ методът има важни предимства: реализира се с прости схеми, много добре е съвместим с цифровите и високочестотните вериги и може да се модифицира за по-добра ефективност. В сигнал-генераторите се реализира с външни или вътрешни IQ-входове (вж). Информацията се сумира с подходящи калибриращи фактори (от ROM памет) и от двата ЦАП се формират двете I- и Q-сигнала, които от своя страна се смесват със сигнала от синтезаторната секция и сумирани излизат на изходната.

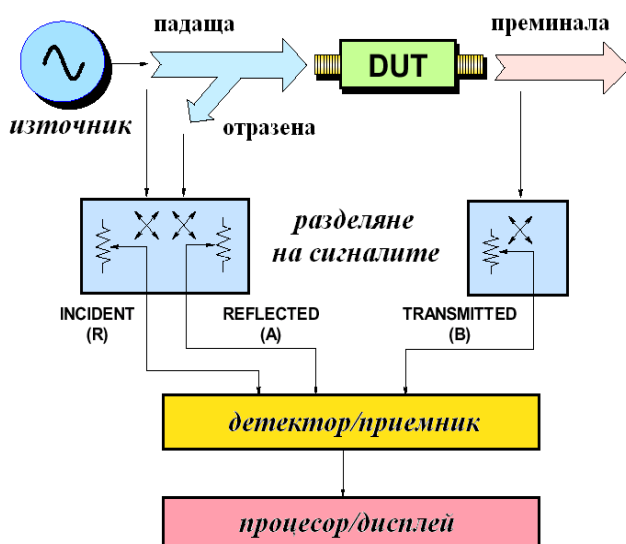


1.3 Микровълнови детектори, смесители, сензори и индикационни устройства



Основни физически явления при взаимодействие на микровълновия сигнал с приемника

Източникът на микровълнов сигнал е само част от необходимата измерителна техника. За да се измери дадено устройство (DUT) трябва още: устройства за разделяне (разпределение) на сигналите (описани в следващия раздел), детектори и приемници за регистрация на сигналите (описани в този раздел) и устройства за обработка, изчисляване и представяне на резултатите от измерванията. В основата на детектирането и регистрацията на микровълнов сигнал стоят следните основни физични явления:



- ❖ Електрически явления, свързани с дрейфови (рядко дифузионни) потоци от носители в твърдо тяло (напр. преобразуване на променлив (микровълнов) ток в постоянен или ток с ниска честота) – това да различни диодни детектори и смесители.

- ❖ Взаимодействие на носителите на заряд с квантите на микровълновото лъчение и изменение на енергетичното им състояние – това са фотоумножители и фотодетектори.

- ❖ Топлинно въздействие на електромагнитната енергия върху работния обем (или повърхност) на приемника (т.е. преобразуване на микровълновата мощност в инфрачервена) – детектори на мощност.

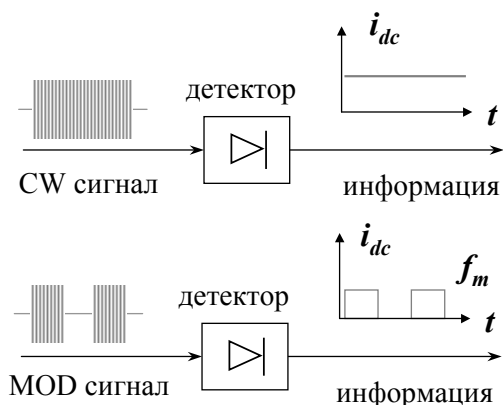
Основни характеристики на микровълновите приемници

Микровълновите приемници са изключително важни за точността и чувствителността на измерителната апаратура. Има два начина на регистрация на микровълнов сигнал: детектиране и смесване (вж. следващата страница). Следните характеристики са особено важни за работата на този вид приемни устройства:

- ❖ **Чувствителност S** : амплитуда на изходния сигнал, съответстващ на единица микровълнова мощност на входа, $\mu\text{A}/\mu\text{W}$; $\mu\text{V}/\text{mW}$. Тази характеристика определя степента на отклик на даден примник при единица входен сигнал;
- ❖ **Минимална измеряема мощност P_{\min}** : плътност на мощността на входа, която може да предизвика на изхода сигнал с 3 dB по-висок от шумовия в единица честотен интервал, $\mu\text{W}/\text{Hz}$; $P_n = kT_n\Delta f$ – еквивалентна шумова мощност; T_n – еквивалентна шумова температура; $P_{\min} = P_n + 3 \text{ dB}$; величината $1/P_{\min}$ се дефинира като регистрираща способност на приемника и е много важна при комуникационните приемници;
- ❖ **Динамичен обхват D** , $\text{dB} = 10 \cdot \lg(P_{\max}/P_{\min})$: отношение (или разлика в dB) между максималната мощност P_{\max} (нивото на насищане) и минималната измеряема мощност P_{\min} на входа; P_{\max} – определя се от точката на 1-dB компресия;
- ❖ **Инерционност (времеконстанта на приемника) τ** , μs : определя бързодействието на приемника за регистрация на модулирани сигнали $S(\Omega) = S_0/(1 + \Omega^2\tau^2)^{1/2}$; Ω - честота на модулиращия нискочестотен сигнал, а S_0 е чувствителността на приемника към немодулиран CW сигнал;
- ❖ **Спектрални (честотни) характеристики на изброените величини**: най-важна от тях е спектралната чувствителност S_ω

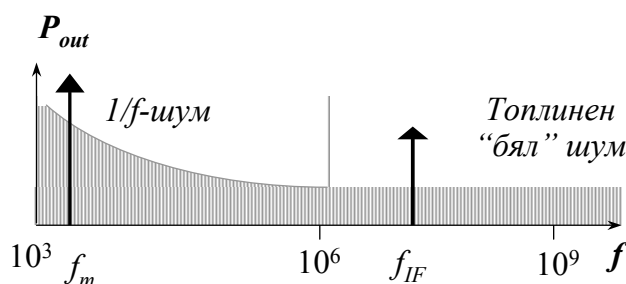
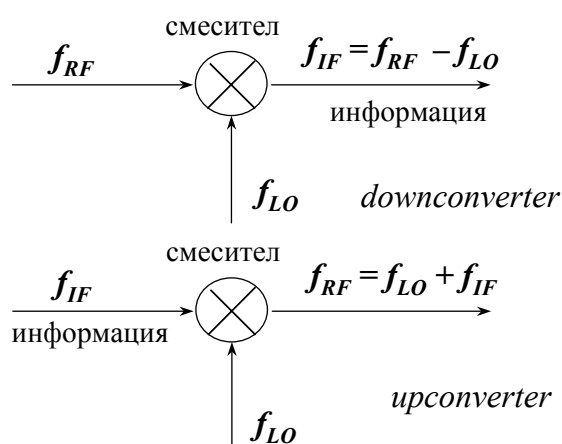
Два основни начина за регистрация на микровълнов сигнал

Детектиране на МВ сигнал



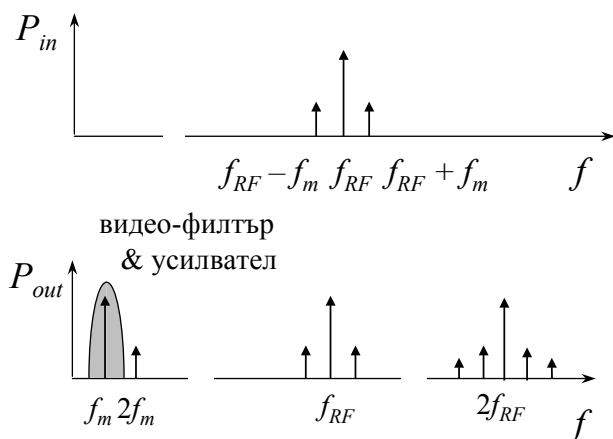
Детектирането е проста регистрация – вид “изправяне” на МВ сигнал в постояннотоков или сигнал с ниска честота f_m , която се ограничава от бързодействието на модулаторите. Тази честота попада в областта на по-висок нискочестотен шум (зоната $1/f$). Обратно, смесването е вид приемане на сигнали чрез преобразуване към междинна ниска честота f_{IF} , далече от нискочестотния шум. Така чувствителността и динамичният обхват рязко се подобряват (вж. и следващата страница).

Смесване на МВ сигнал

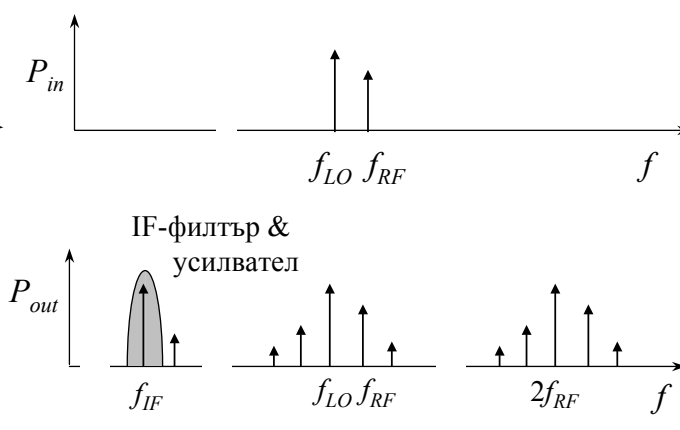


Спектри на сигналите преди и след регистрация

детектиране



смесване надолу



Характеристики:

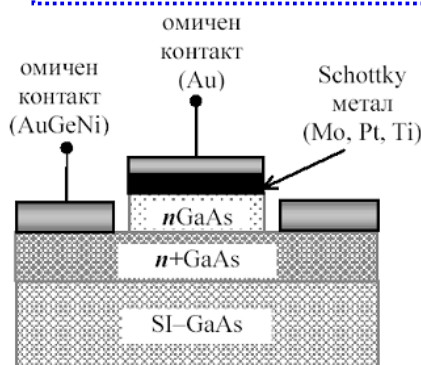
- Чувствителност $\sim 1-10 \mu\text{A}/\mu\text{W}$
- Честота на детекция: типично 1 kHz, 27.8 kHz (*hp*); до 100 kHz
- $P_{\min} \sim 10^{-9} \text{ W}$ ($\sim -60 \text{ dBm}$)
- Динамичен обхват $D \sim 30-40 \text{ dB}$ до 70 dB

Характеристики:

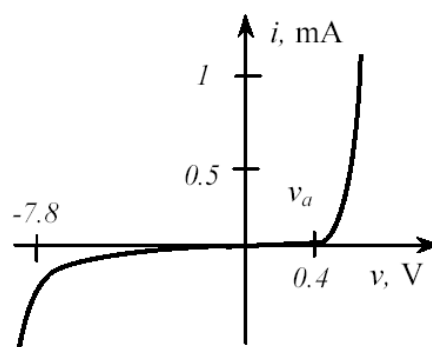
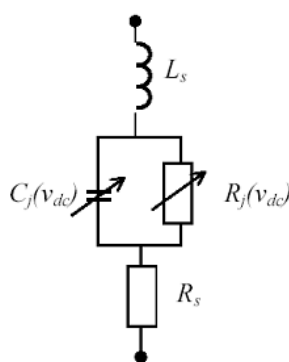
- IF честота: $\sim \text{MHz}$ до 2 GHz
- $P_{\min} \sim 10^{-12} \text{ W}$ ($\sim -120 \text{ dBm}$); за сметка на по-високата междинна честота
- Динамичен обхват $D \sim 100-110 \text{ dB}$ до 140 dB

Сравнението на характеристиките недвусмислено показва, че приемането на микровълнов сигнал чрез смесване е значително по-чувствително, с по-голям динамичен обхват и по-надеждно. То е в основата на практически повечето съвременни измерителни устройства.

Детекторни и смесителни диоди – най-популярните сензори

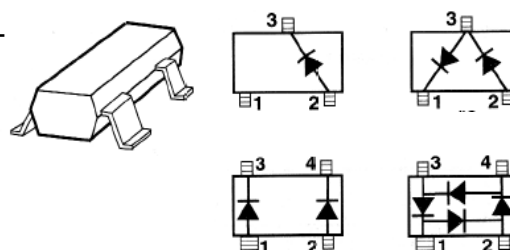


Shotky диоди: (диоди "M-SC")



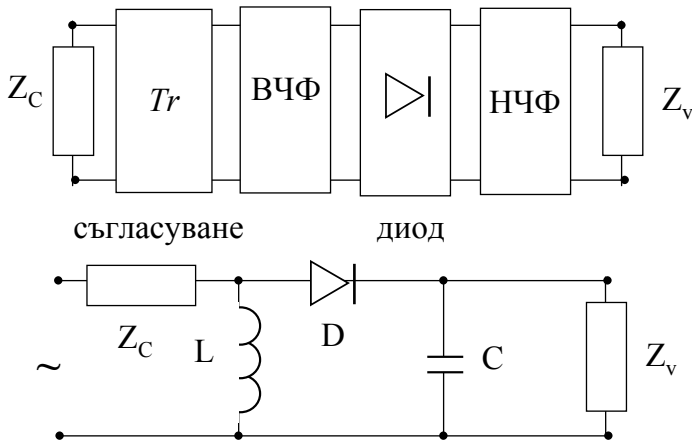
V-A характеристика

В качеството на нелинеен елемент (нелинейни съпротивление) при детектирането и смесването на микровълнов сигнал се използват детекторни и смесителни диоди. Това най-често са диоди с преход преход "метал-полупроводник" (Schottky диоди, Motta диоди и др.). При смесителите се използват и FET-транзистори. Еквивалентната схема е подобна на изправителните диоди, но V-A характеристика е с по-голяма стръмност, а диодите са по-високофреkwентни, понеже са практически униполярни (e-носители). Граничната им честота в корпус (GaAs-подложка) достига $\sim 100 \text{ GHz}$, а без корпус – до 1 THz. За по-висока чувствителност се използва и преднапрежение.



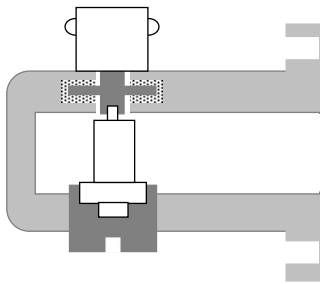
Предлагат се в един корпус по 1, по 2 (отделни и противоположно свързани) и по 4 в специална балансна схема

Детекторни секции



Принципна схема:

От RF гледна точка детекторната секция е съгласуван двуполусник. Диодът е нелинеен елемент за получаване на богатия спектър и преобразуване на RF сигнала в нискочестотен върху видео-съпротивлението. Предназначение на филтрите: НЧФ – да не допусне RF сигнал към нискочестотния изход; ВЧФ - да изолира RF входа от нискочестотни и dc съставки.



Вълноводна детекторна секция

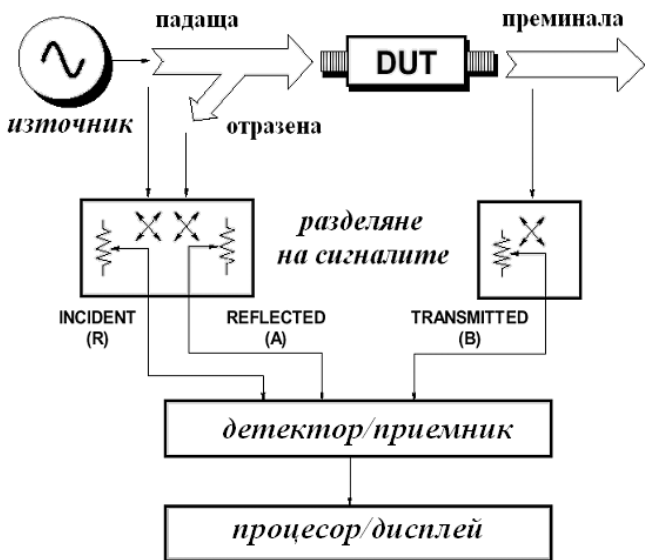


Коаксиална детекторна секция

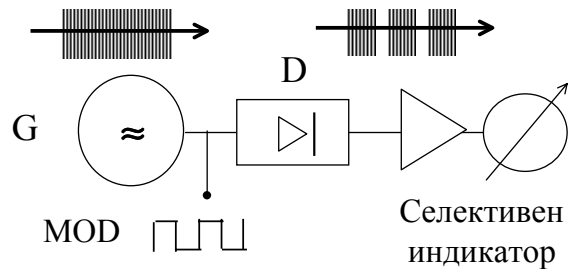
Реализация:

Първоначално детекторните секции се реализират основно чрез вълноводно изпълнение. Поради високото съпротивление на вълновода, те се нуждаят от специално съгласуване. Днес детекторните секции се предлагат предимно в коаксиално изпълнение с 50-омен вход и са отлично съгласувани към източника на сигнал.

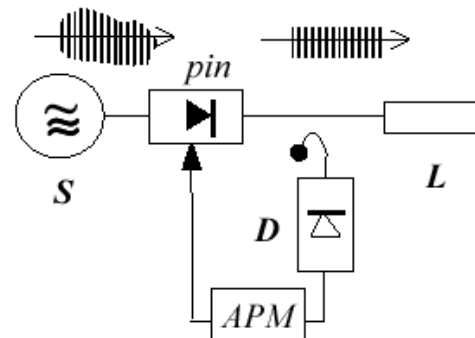
Начини на използване на детекторни секции



1) Най-често срещаният метод – мониторинг на сигналите през насочен отклонител, без да се влияе върху тях. Това е основната измерителна схема в скаларните анализатори на вериги

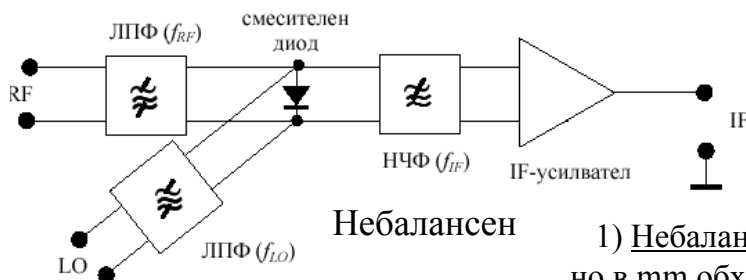


2) Директна индикация на не много силни АМ модулирани сигнали

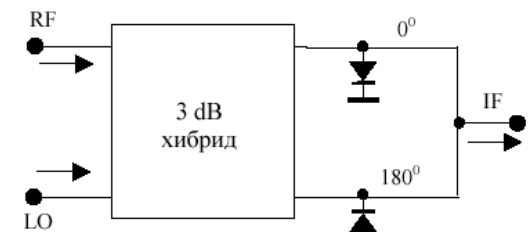


3) Използване за автоматична регулировка (APM) на нивото на сигнала

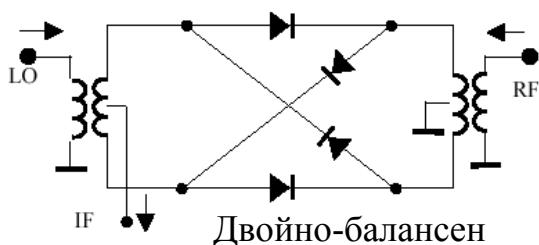
Смесители



Небалансен



Едно-балансен



Двойно-балансен

Принципни схеми:
небалансни (еднодиодни) и
балансни (с два и повече диода)

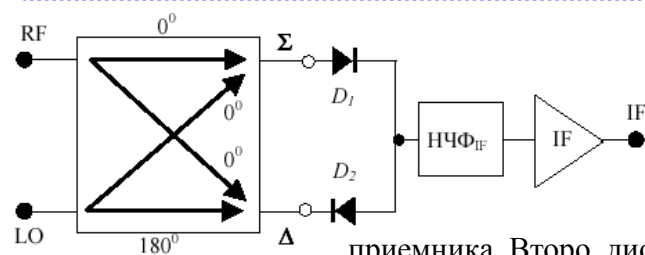
Реализация:

1) Небалансни (еднодиодни) - използват се основно в mm обхват). Причина са лошите характеристики за по-ниски честоти: слаба изолация между рамената RF и LO, високи загуби на преобразуване L_c , високо шумово число NF_m и малък динамичен обхват DR .

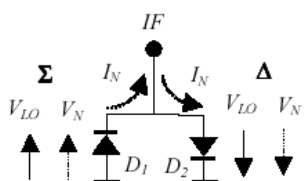
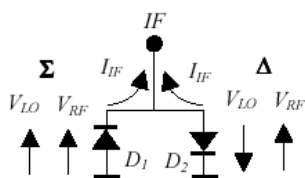
2) Балансни (компенсирани): имат по-добра изолация между рамената RF и LO, по-нисък коефициент на шум и широк динамичен обхват. Двойно-балансният смесител има най-добри характеристики, но схемата му е по-сложна и необходимата мощност на LO е 4 пъти по-висока от тази на еднодиодния смесител.

Основната отличителна черта на едно-балансният смесител е използването на 3-dB делител за входните RF и LO сигнали, на изходите на който са свързани срещуположно два диода (вж следващата стр.)

Действие на едно-балансия смесител



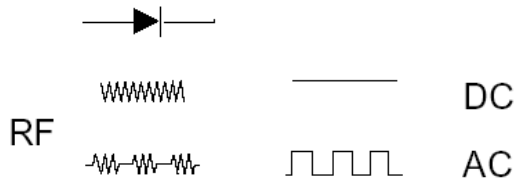
С тази конфигурация се решават няколко проблема. Първо, съществено се подобрява изолацията между RF и LO сигналите в сравнение с еднодиодния смесител. Така, дори смесителят да не е добре съгласуван, RF и LO входовете са надеждно разделени, което е съществено за работата на приемника. Второ, диодите са свързани в 3-dB изходни рамена на хибрида, така че LO сигналът "напомпва" диодите в противофаза, а RF-сигналът – във фаза. Тази балансирана работа на диодите обезпечава силно подтискане на шумовите сигнали от LO, намалява загубите от преобразуване и подобрява динамичния диапазон на балансия смесител.



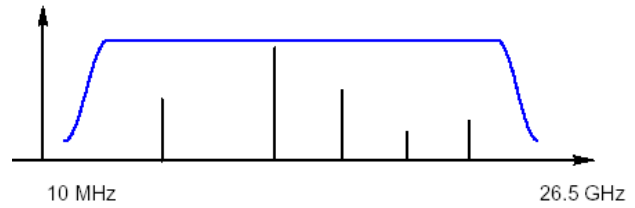
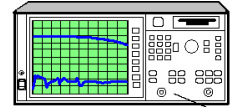
От гледна точка на пътя на входните сигнали, схемата се състои от два отделни смесителя с по един диод. В сумиращото рамо на хибрида, отбелязано със " Σ ", RF и LO сигналите постъпват във фаза (с фазова разлика 0°), а в диференциалното рамо, отбелязано с " Δ " – в противофаза (с фазова разлика 180°). Понеже диодите D_1 и D_2 са свързани противоположно, получените при смесването IF-токове от двата диода на междинна честота f_{IF} се сумират в общото изходно IF рамо. Обратно, при смесването на LO сигнала и случайните шумови сигнали, генерирани в LO, индуцираните шумови токове I_N са противоположни и се компенсират. Описаният балансиран процес на смесване на сигналите в балансия смесител съществено зависи от еднаквостта на характеристиките на двата смесителни диода и начина на тяхното монтиране в схемата. Затова смесителните диоди често се аранжират по двойки или по четворки в един и същи корпус и в този си вид са предназначени за вграждане в балансни смесители.

Два типа детектиране при анализаторите на вериги

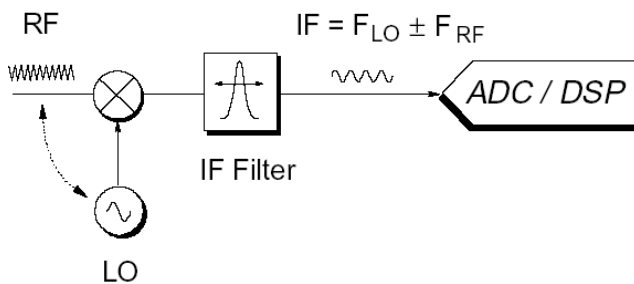
Широколентово детектиране (диодна секция)



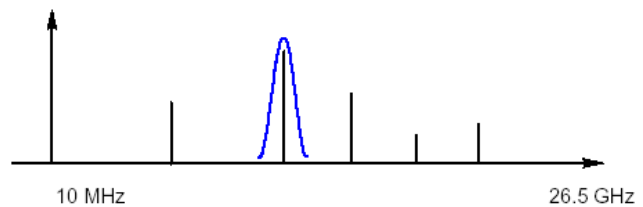
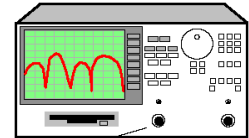
при по-старите SNA



Тяснолентово детектиране (смесителен приемник)

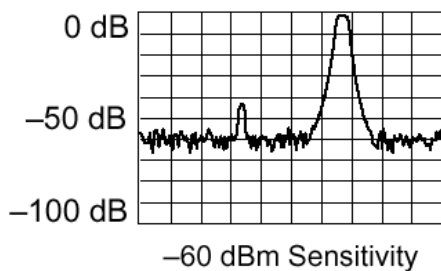


при по-съвременните SNA и всички VNA



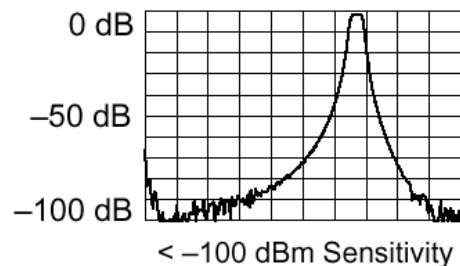
Широко- и тяснолентово детектиране - свойства

Широколентово детектиране (диодно)



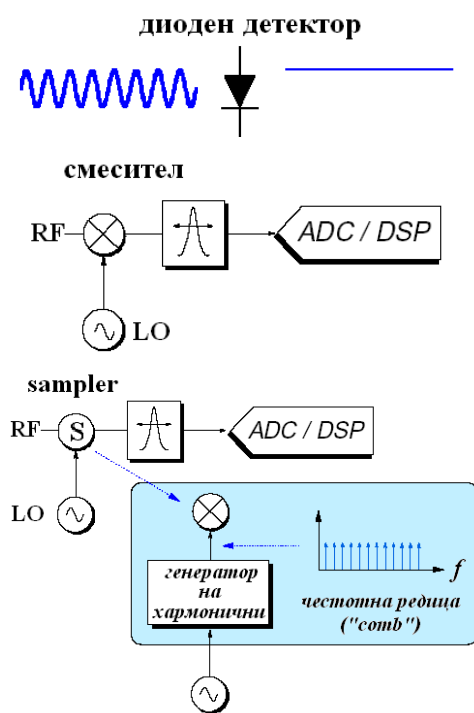
- Широколентовост и възможност за измерване на устройства с различен честотен отклик (RF, LO, IF)
- Евтини приемници: обикновени детектори
- По-малък динамичен обхват при измерване на нивото
- Паразитни (фалшиви) отклици извън честотната лента на устройствата (сериозен проблем)
- Детектира само амплитуда (без фаза) на сигналите; използва се в старите скаларни NA

Тяснолентово детектиране (смесителен приемник)



- Отклик в много тясна лента; ширина на IF филтъра типично 3 kHz, но има и варианти с лента ~10Hz
- Скъпи приемници (down converters)
- Доста по-висока чувствителност и по-голям динамичен обхват
- Спектрална чистота (липса на фалшиви сигнали извън честотната лента)
- Регистрира едновременно амплитуда и фаза на сигналите; използва се при всички векторни и съвременни скаларни NA. Използва се и при спектроанализаторите.

Детектор, смесител или sampler



Диодните детектори имат две очевидни предимства – едно устройство покрива широк честотен обхват: 10 MHz – 26.5 GHz и са най-евтиният тип микровълнови приемници. Широколентовостта им, обаче, силно ограничава тяхната чувствителност (до -50 dBm) и динамичен обхват (~ 60 dB). АС детектирането се предпочита пред DC детектирането поради по-голямата се по-висока чувствителност и точност и по-слаб дрейф и шум и редуция на смущенията.

Теснолентовите приемници могат да се реализират с два типа входни устройства – смесители (mixers) и samplers. За да се измерват сигнали в широка лента трябва пренастройваем локален осцилатор LO. Смесителят използва широколентови фундаментални LO, но sampler-ът е по-евтиното решение при широколентови източници и има по-голямо приложение в съвременните анализатори на вериги. Sampler-ът е смесител, който вграден импулсен генератор. Последният създава широк спектър (frequency “comb”) от хармоничните на LO. Чрез смесителен диод къси времеви порции от RF сигналът се смесват поотделно с всяка от

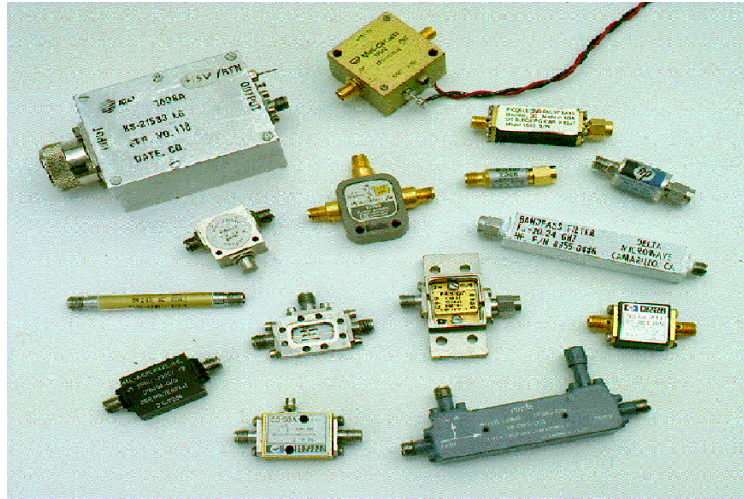
спектралните линии (“comb tooth”) и така се изработват сигналите на междинна честота. Проблемите при sampler-базираните измерителни приемници са по-сложната процедура на PLL синтеза за всяка от линиите, по-тесният динамичен обхват и допълнителния шум в IF сигнала от “comb”-линиите. Този динамичният обхват, обаче, е значително по-голям от този на детекторните приемници.

Други детектори и сензори за микровълнов сигнал

- Диоди “Me-SC” (Shotky): стръмна квадратична ВАХ ($\sim x^2$); голямо бързодействие; “точкови” диоди (най-старите детектори W-Ge или W-Si) за ниски честоти
- Диоди с горещи носители (nn^+ , pp^+): нееднородна площ – термодинамично неравновесие: термоЕДН; стръмна ВАХ ($\sim x^3$); издържат силен сигнал, но са с малка чувствителност
- Диоди “Me-Me”: много стръмна ВАХ; изключително голямо бързодействие (до IR обхват); не издържат претоварване
- FET като сензори: като активни смесители, голямо бързодействие и чувствителност, възможност за регистрация и усилване, интегрален модул (LNA)
- Детектори за мощност: много голямо разнообразие: термистори и болометри (с отрицателен или положителен температурен коефициент на съпротивлението); термодвойки (метал-полуметал); широколентови безинерционни Hall-датчици; пиезоелектрични детектори (реагират на механичното (пондермоторно) налягане на микровълновия сигнал); пиро-електрични детектори (промяна на поляризуемостта на кристала) и др.
- Нестандартни детектори: Охлаждаеми детектори (свърхпроводящи детектори и болометри, детектори на фото-проводимост, детектори на циклотронен резонанс); параметрични и квантови параметрични усилватели (мазери) - за много ниски шумови нива и високи честоти), Доплерови приемници
- Квазиоптични детектори: Квантови броячи на фотони; атомни (Ридбергови) снопове; екситонни детектори - броячи на екситони (двойка “електрон-дупка”) и др.

Забележка: Част от тези детектори са разгледани в Лекция 2

1.4 Допълнително измерително оборудване в микровълновия обхват

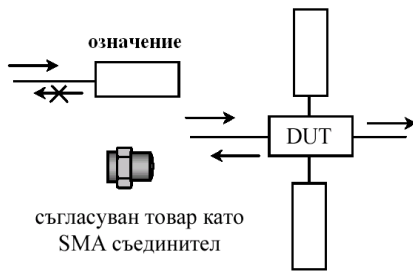


Основни елементи и устройства (аксесоари), които подпомагат микровълновите измервания

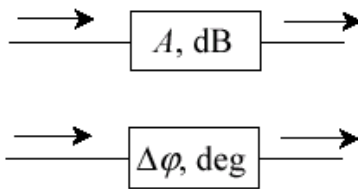
Източникът и приемникът са най-важната част на даден микровълнова измерителна схема, но за да се осъществи измерването са необходими и серия допълнителни устройства (измерителни аксесоари). В списъка по-долу са изброени част от тези устройства, а по-важните са разгледани накратко в настоящата лекция (още информация има и в Лекция 5).

- Съгласувани товари;
- Атенюатори;
- Фазорегулатори;
- Взаимни и невзаимни разпределящи устройства;
- Смесители;
- Насочени отклонители и рефлектометрични мостове;
- Филтри;
- Микровълнови измерителни кабели;
- Съединители (адаптери) и преходи;
- Принадлежности за калибровка;
- Измерителни фикстури за измервания “in-fixture”;
- Сонди за измерване “on-waver”;
- Калибрирани измерителни антени;
- DC захранвания;
- Термостати и охлаждащи системи и много др.

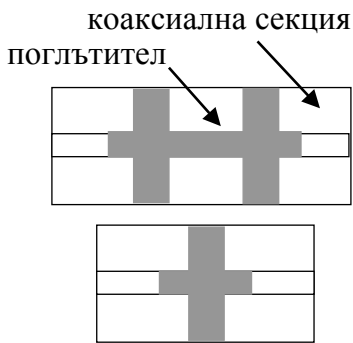
Съгласувани товари; атенюатори и фазорегулатори



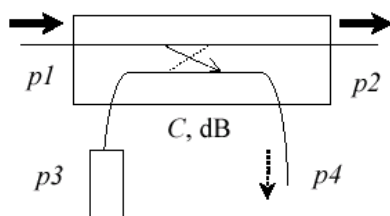
Съгласувани товари. Поставени в края на вълновода (или към свободните рамена на устройство; вж. фигурата), те поглъщат целия сигнал и така имитират “режим на бягща вълна”, т. е. отразеният сигнал отсъства (или е много слаб). Така основно свойство на съгласувания товар като измерително устройство е да има нисък коефициент на стояща вълна (типично $SWR \sim 1.06-1.1$) и да “затваря” свободните от измервания рамена.



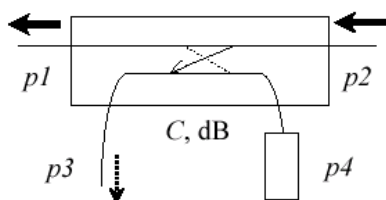
Атенюатори и фазорегулатори. В измерителната техника често се налага да се използват устройства, чрез които може да се внесе определено затихване или фазово закъснение на сигнала. Необходимост от внасяне на затихване възниква при калибриране на измерителни системи, при намаляване на висока изходна мощност от генератора, при измервания на затихване/усилване на устройства по метода на заместването и пр. Атенюаторите се вграждат на изхода в микровълновите генератори, но има и такива като самостоятелни устройства. Атенюаторите могат да бъдат както регулируеми (механично или електронно), така и с фиксирано стандартно затихване (напр. $A = 3, 6, 10$ и 20 dB). Необходимост от промяна във фазата се налага по-рядко, основно в структурите, чувствителни към фазовите разлики във сигналите в различните канали (напр., при фазираните антени решетки). Най-често за измерителни цели се използват електронно-пренастойваеми феритни, pin-диодни и FET-фазорегулатори.



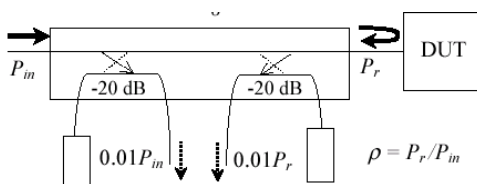
Насочени отклонители и мостове



Насочен отклонител за падаща вълна



Насочен отклонител за отразена вълна



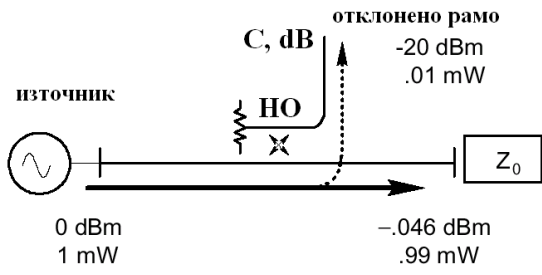
Двоен насочен отклонител за падаща и отразена вълна

При много типове измервания в микровълновия обхват се налага отклоняване на част от сигнала (напр. при мониторинг на даден параметър - мощност, честота, спектър и пр.). За целта се използва **насочен отклонител**. Това е четири-раменно устройство и представлява два свързани вълновода, единият от които е основен ($p1-p2$), а другият – отклонен ($p3-p4$). Така, ако сигнал с мощност P_{in} се подаде на рамо 1, той излиза в рамо 2 слабо затихнал, а в рамо 4 се появява слаб сигнал с мощност $P_{in} - C, \text{ dBm}$, където $C, \text{ dB}$ е коефициент на връзка в отклоненото рамо (coupling coefficient). Рамо 3 остава изолирано за входен сигнал от рамо 1 и се натоварва със съгласуван товар. Обратно, ако сигнал от 2 се подаде към 1, част от него (затихнал с $C, \text{ dB}$) се отклонява в 3 (сега 4 е изолирано). (Забележка: означенията на отклонените рамена са условни). Ако се използват едновременно два насочени отклонителя, се образува **рефлектометричен мост**, чрез който могат да се измерват коефициенти на отражение и стояща вълна на устройства, включени след моста.

На следващите две страници са дадени изрази за параметрите, примери за свързване на насочени отклонители и източници на грешки при измерванията, свързани с тях.

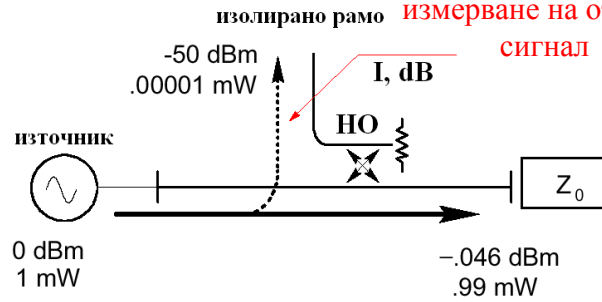
Източници на грешка при насочени отклонители

Свързване за падаща вълна;
forward coupling



$$C, dB = -10 \log \frac{P_{coupling\ forward}}{P_{in}}$$

Свързване за отразена вълна;
reverse coupling



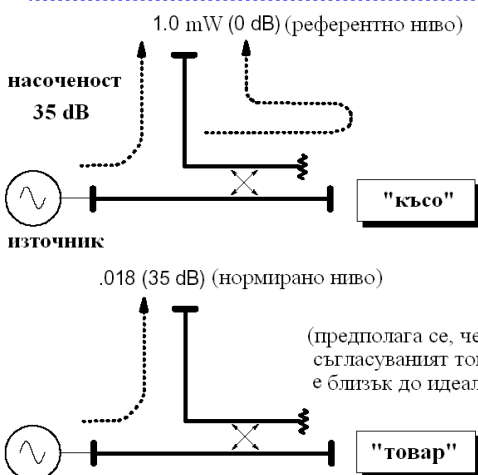
$$I, dB = -10 \log \frac{P_{coupling\ reverse}}{P_{in}}$$

Това сега е грешен (паразитен) сигнал при измерване на отразен сигнал

Съгласно предназначението си, насоченият отклонител (НО) трябва да “отклони” C, dB от основния сигнал в отклонено рамо при право свързване. Гореподобен е даден пример за 20-dB НО. Ако същият НО се включи обратно, в идеалния случай трябва да “отклони” 0 dB (идеална изолация). В реалния случай, обаче, обикновено малка част от сигнала “изтича” при обратно свързване в отклоненото рамо – крайна изолация I, dB (в случая $-50 dB$). Следователно, може да се въведе термина “насоченост” D, dB на НО (directivity). Насочеността е мярка за способността на НО да отдели сигнала в права посока от паразитния сигнал в обратна посока (в дадения случай $D = |50 - 20| = 30 dB$).

$$D, dB = 10 \log \frac{P_{coupling\ forward}}{P_{coupling\ reverse}} = |I - C|, dB$$

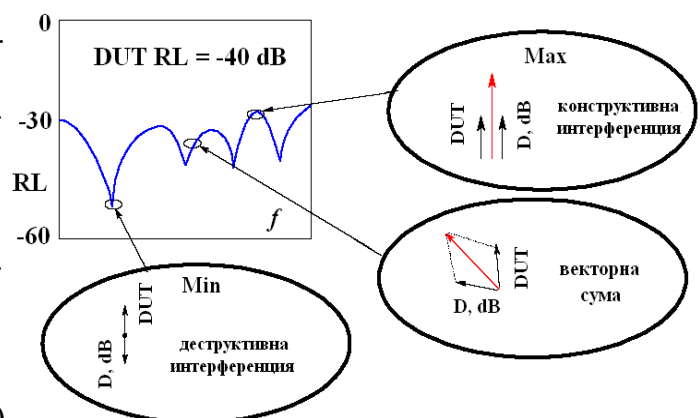
Измерване на насочеността



Лесен начин за оценка на насочеността D на даден измерителен НО, като се измерва нивото на сигнала в отклоненото рамо при подаване на входа само в права посока (без НО да се свалят от измерителната схема), е илюстриран на фигурата. Първо крайът на НО се дава накъсо (с помощта на почти идеално “късо” съединение) и се нормира референтно ниво 0 dB. После крайът се натоварва с близък до идеален товар и се измерва слабо нормирано ниво, което е равно на насочеността на НО. Методът е подходящ за стойности $D > 10 dB$.

$$\text{Насоченост } D, dB = 35 dB - 0 dB = 35 dB$$

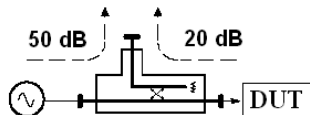
Насочеността D на измерителните НО трябва да е достатъчно голяма, за да се минимизират грешките от измерване на различни устройства. Даден е пример за измерване на обратни загуби $RL \sim -40 dB$ на отлично съгласувано устройство. Ако при измерването се ползва НО с $D = 35 dB$, поради наличието на паразитен отразен сигнал се наблюдава интерференция със сигнала от устройството и типична честотна картина с минимума и максимуми (ripples)



Пример за едновременно включване на насочен отклонител и атенюатори (неочаквано влошаване на насочеността)

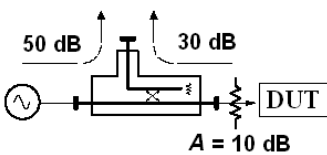
При измерванията често се налага да се използва както насочен отклонител (за отделяне на сигнал), така и атенюатор (за намаляване на нивото му). Внимание! В този случай при неподходящо свързване е възможно неочаквано да се влоши точността на измерването. Как може да се получи това? На фигурата долу е илюстриран пример с НО с $D = 30$ dB (дадена е и новата формула за изчисляване на насочеността, ако има включен атенюатор със затихване A , dB). Ако атенюаторът се включи след НО, той намалява нивото на отразения от устройството (DUT) сигнал с $10 + 10 = 20$ dB, без да влияе на изолацията. Така насочеността пада от 30 на едва 10 dB и схемата е неподходяща за измерителни цели поради слаба насоченост на НО. Обратно, ако атенюаторът се включи пред НО, насочеността остава 30 dB.

$$D, dB = |I - C - A|, dB$$



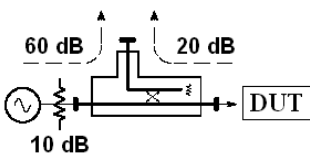
1. Без атенюатор

$$D = 50 \text{ dB} - 20 \text{ dB} = 30 \text{ dB}$$



2. С атенюатор след НО за отразен сигнал

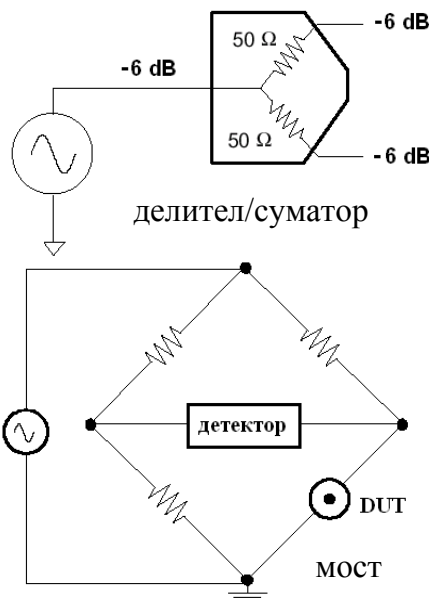
$$D = 50 \text{ dB} - 30 \text{ dB} - 10 \text{ dB} = 10 \text{ dB}$$



3. С атенюатор преди НО за отразен сигнал

$$D = 60 \text{ dB} - 20 \text{ dB} - 10 \text{ dB} = 30 \text{ dB}$$

Други измерителни устройства: делители (суматори), измерителни мостове, филтри, циркулятори и изолатори и пр.

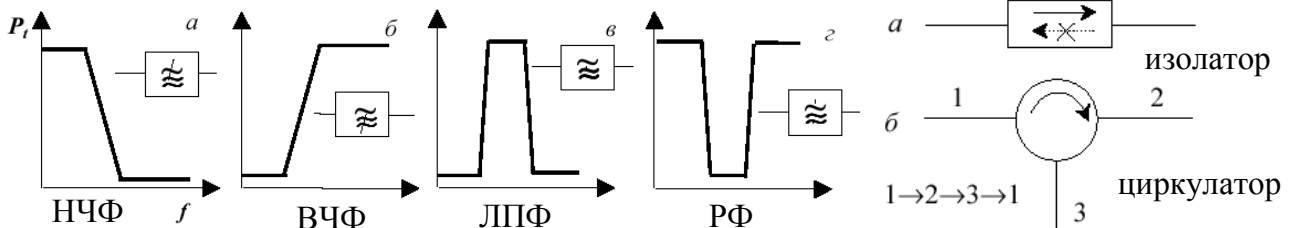


Делител (суматор): Това е резистивно устройство за разделяне/сумиране на сигнали синфазно. Пример: падащата вълна се разделя по -6 dB в два измерителни канала - за контрол и измерване. Всъщност, останалите -6 dB се отразяват обратно.

Измерителен мост: Това е съгласуван мост на Wilkinson, в едното рамо на който се включва измерваното устройство

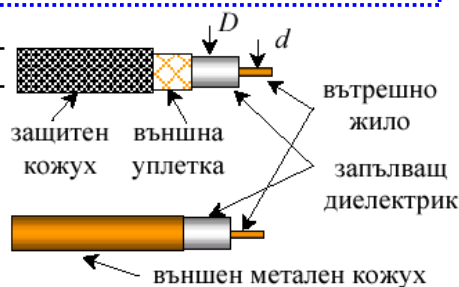
Измерителни филтри: При измерване на устройства точно в определена честотна лента и отстраняване на паразитни сигнали извън лентата се използват измерителни филтри: нискочестотни НЧФ, лентово-пропускащи ЛПФ (двата най-често), високочестотни ВЧФ и режекторни РФ.

Нереципрочни устройства: Това са устройства за едно-посочно разделяне на сигнали: изолатори за разделяне на източник от товар и циркулятори за насочено разпределяне на сигнал.



Измерителни кабели

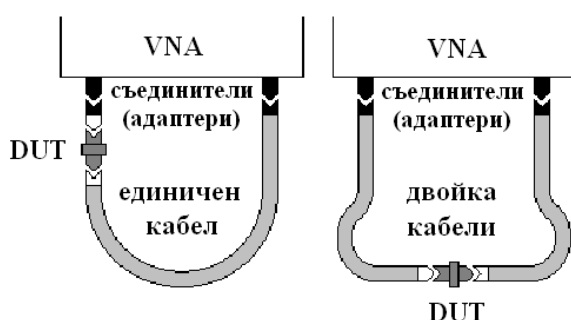
Микровълнови кабели: Те са важен детайл при измерванията. От измерителна гледна точка ще ги разделим на измерителни и обикновени. Обикновените кабели са аксесоар към даденото устройство. Това са 50-омни отрязъци от коаксиални вълноводи (линии), завършващи със съединители (вж. следващата страница). В зависимост от приложенията се предлагат следните видове: гъвкави, твърди, полутвърди и полугъвкави. Важни техни параметри са: характеристичен импеданс Z_C , загуби на единица дължина α_C , гранична честота на приложение f_C и др. (вж. дадените изрази за тях).



$$Z_C = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left[\frac{D}{d} \right]$$

$$\alpha_C = \frac{0.014272 \sqrt{f}}{Z_C} \times \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right)$$

$$f_C, GHz = \frac{191}{\sqrt{\epsilon_r} (D+d), mm}$$

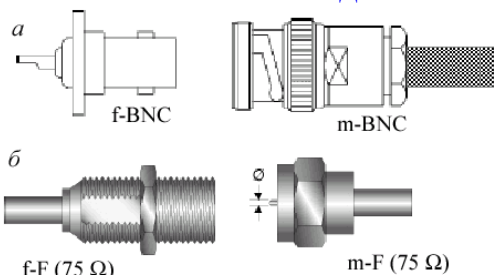


Измерителни микровълнови кабели: За разлика от обикновените те трябва да са отлично съгласувани (50 Ома) в целия диапазон на измерване, да имат малки загуби (т.е. да са дебели и с добър запълващ диелектрик), да са достатъчно гъвкави или полугъвкави и да имат много стабилна фаза, която се запазва при огъване, усукване или температурни промени). За съжаление, те са много скъпи измерителни аксесоари.

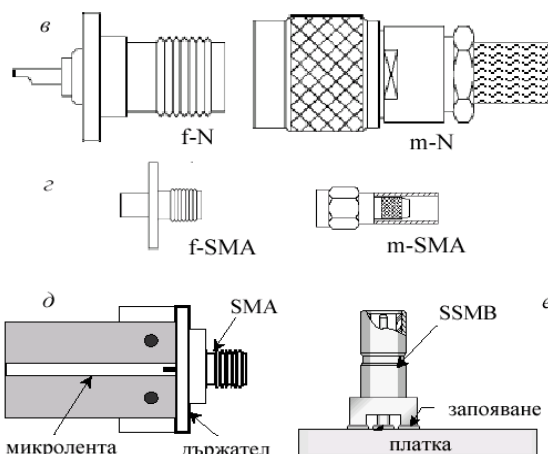
Съединители (адаптери)

Съединителите също могат да се разделят на измерителни и обикновени (за устройства и кабели). Долу са дадени примери за най-използваните от тях в микровълновия обхват (подробности в каталози на фирми-производители).

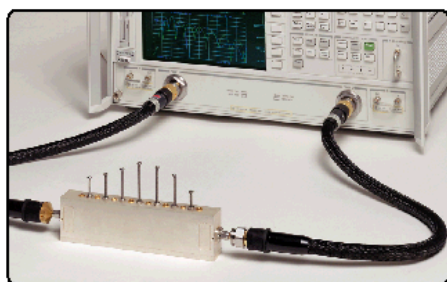
Нискочестотни съединители



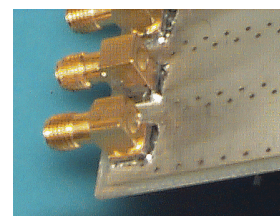
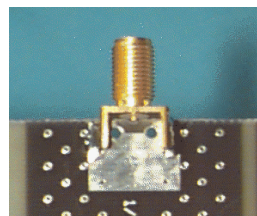
Високочестотни съединители



Тип съединители – разнообразен
Пол на съединителя – мъжки m; женски f

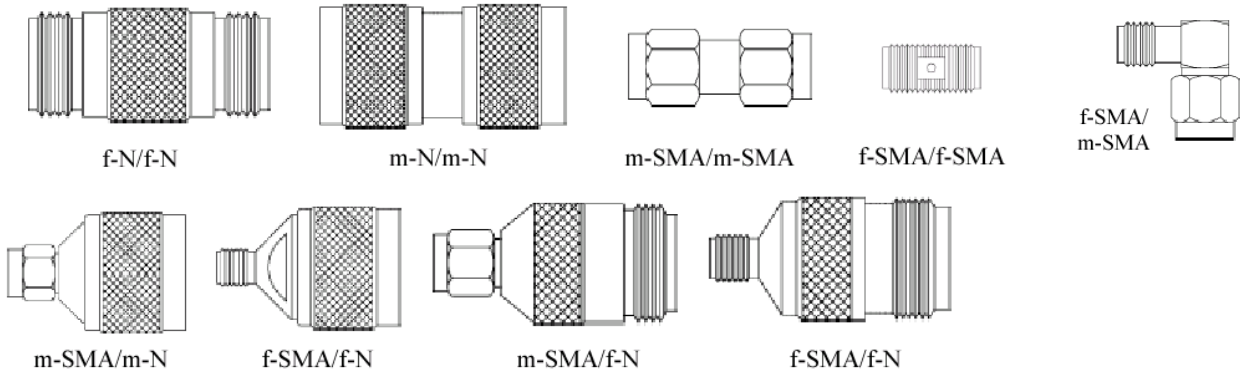


За измерителни цели: те са много прецизни, с малко износване, позлатени, много скъпи

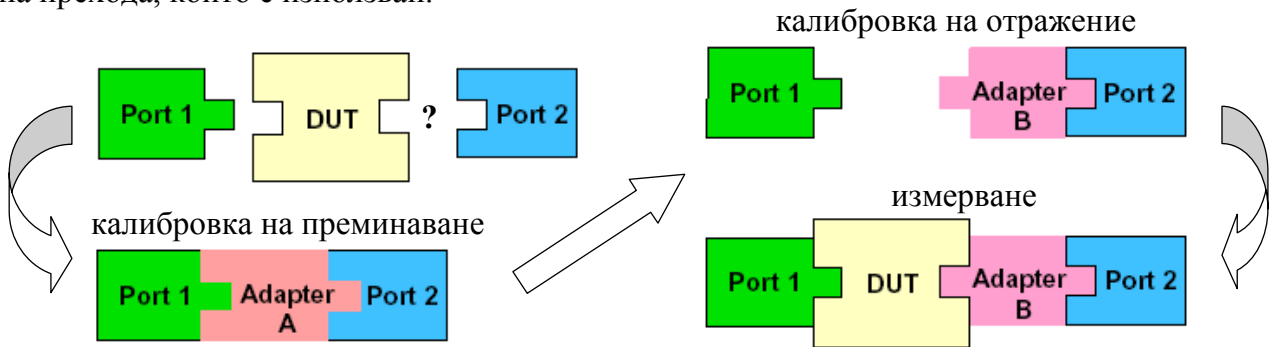


Съединители, монтирани директно върху платката с устройството

Преходи между съединители



За всяко измерване са необходими съединителите да са от еднакъв тип и противоположен пол. Ако това не е така, търсят се подходящи преходи между съединителите по тип и пол (вж. примера долу). Точността на калибровката и измерването пряко зависи от качеството на прехода, който е използван.

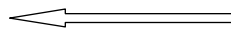


Оборудване за калибровка (calibration kit)

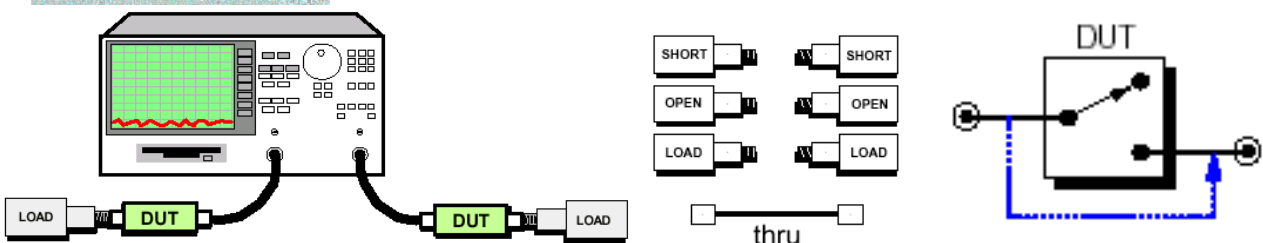
Преди измерване трябва да се извърши калибровка на използваната измерителна апаратура. Това е начин за отчитане на влиянието на характеристиките на измерителна система без устройството (DUT) чрез въвеждане на корекции за грешки и отчитането им при обработка на сигналите на дисплея. Това е абсолютно необходимо за правилното измерване на собствените параметри на устройството (DUT). Извършва се преди всяко измерване при почти всички измерителни прибори с малки изключения, като се ползват специални калибровъчни елементи. В Лекция 5 са разгледани подробности за калибровката на анализатори на вериги.



Елементи за механична калибровка на входовете на анализатор на вериги

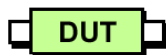


Устройства за електронна калибровка



Видове калибровка при анализатори на вериги

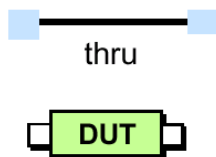
UNCORRECTED



Без калибровка:

- просто директно измерване
- на практика измерването без калибровка е некоректно (използва се само за груби оценки)
- няма корекции на характеристиките на измерителното оборудване – детектори, кабели, съединители и др.

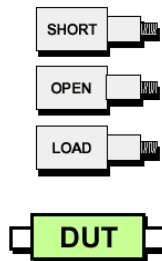
RESPONSE



Проста калибровка:

- лесна реализация
- използва се при не много точни скаларни измервания
- има само честотна корекция на отклика на измерителната система без устройството

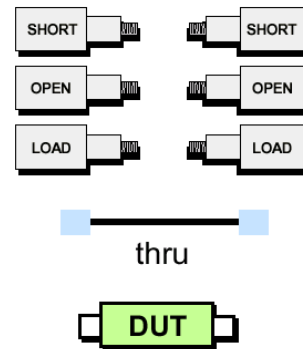
1-PORT



Калибровка за 1 рамо:

- само за измерване на отражение
- нуждае се от добре съгласуван товар
- Има корекции за: неидеална насоченост, неидеално съгласуване на източника и на измерителната равнина за отражение

FULL 2-PORT

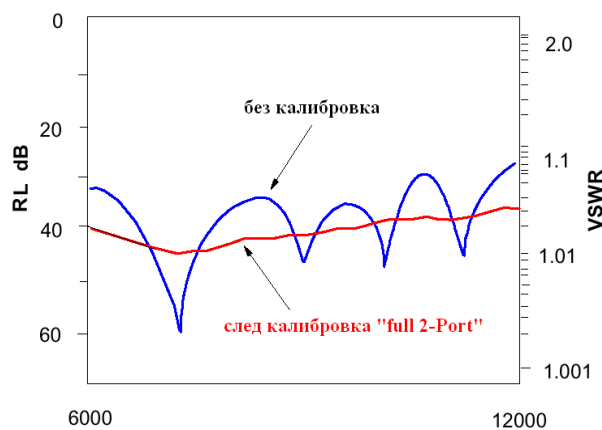
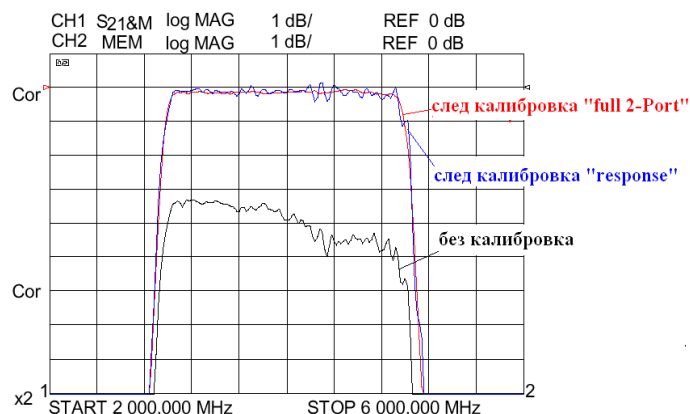


Калибровка за 2 рамена:

- най-висока точност
- Има корекции за: неидеални насоченост, неидеално съгласуване на източника, на измерителните равнини за отражение и преминаване, за изолация между рамената

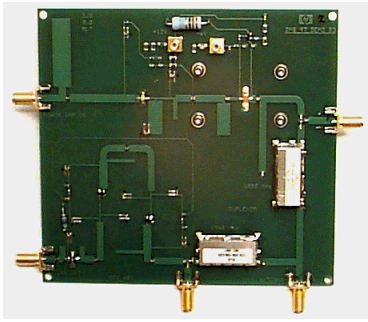
Точност на измерването според вида на калибровката

Извършването на калибровка влияе директно върху точността на измерванията, като се отчитат т.нар. систематични грешки. В устройствата за измерване на мощност има вградени калибрирани източници на ниво. При честотомерите и спектроанализаторите се вграждат стабилизиращи източници на честота. При измервания на коефициент на шум се извършва предварителна калибровка с помощта на генератора на шум. При анализаторите на вериги се ползват външни елементи: “Short”, “Open”, “Load”, “Thru” (SOLT), и др. както е показано на предишната страница.

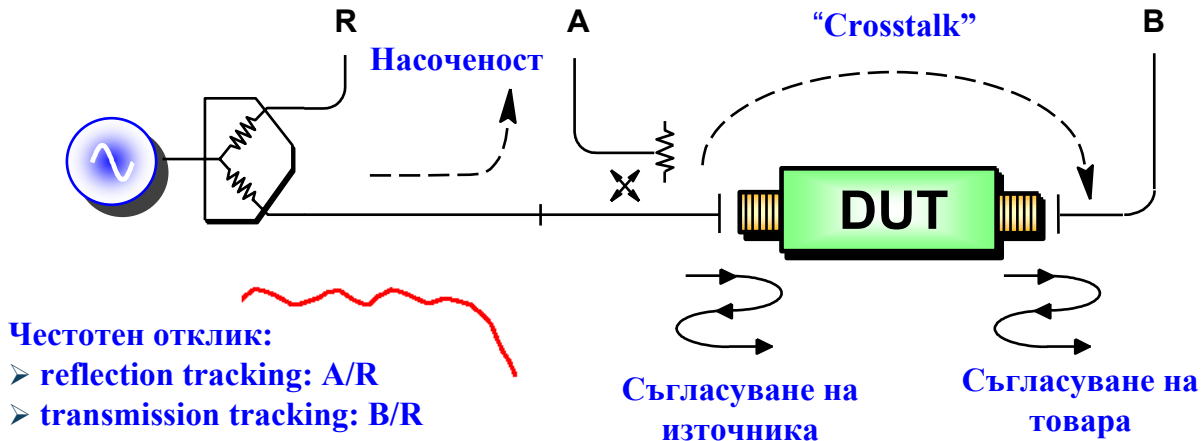


Примери: Показваме резултатите от измервания на S параметри на две устройства, получени с и без калибровка. Първият се отнася до обратните загуби RL - появата на минимума и максимуми, свързани с неидеалната насоченост на НО. При внесените загуби IL измерванията без калибровка включват загубите целия измерителен тракт. Калибровката ‘response’ отчита тези загуби, но не отчита фазовите грешки. Само пълна “full 2-port” калибровка дава реалистични данни за собствените IL.

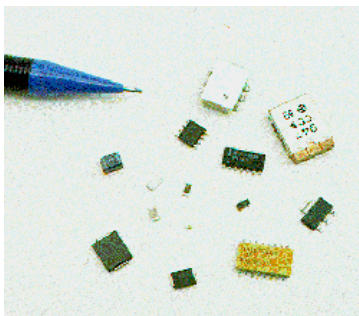
Измерване на устройства в корпус и със съединители



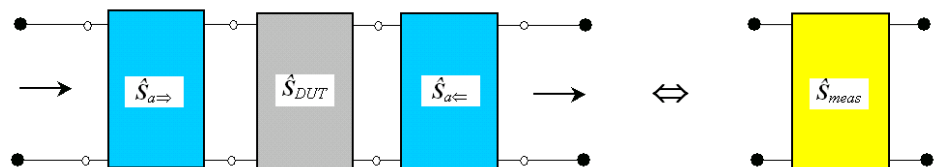
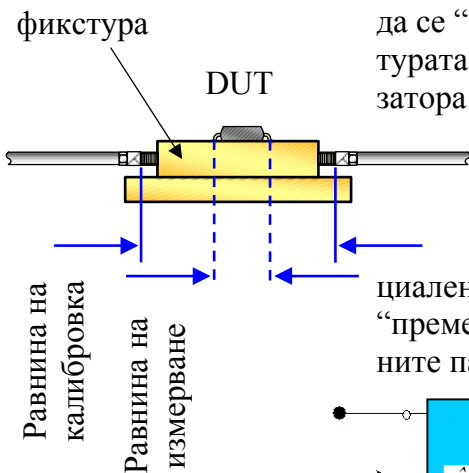
В микровълновата техника често се измерват устройства в собствен корпус/платка и съединители на входовете/изходите. Тази ситуация е най-изгодна за измерванията: необходимо е само да се извърши калибровка на измерителния прибор. Долу са показани главните източници на грешки, отчитани при калибровката. Грешките, свързани с “изтичане” на сигнал са крайната насоченост и “crosstalk” (паразитно влияние между входа и изхода). Грешките, свързани с отражението са разсъгласуването на източника и на товара. Последният тип грешки са свързани с неидеалността на честотния отклик на приемниците, наречен “tracking” на отражение и на преминаване на сигнала (още е Лекция 5).



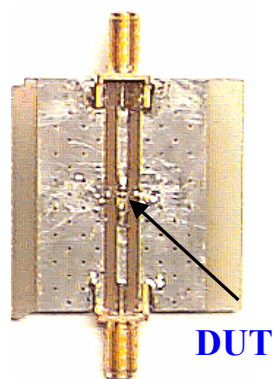
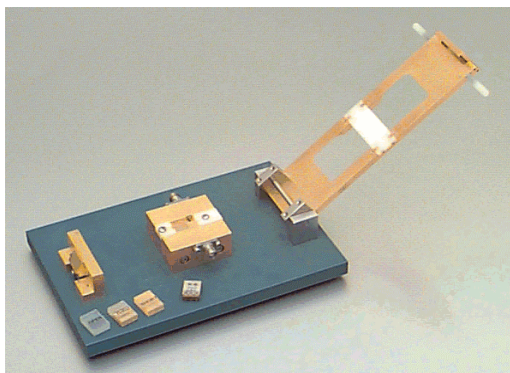
“In-fixture” измерване



Много често, обаче, устройствата, които трябва да се измерят, нямат коаксиални входове/изходи или собствен корпус (диоди, транзистори, интегрални схеми, резистори, чип-кондензатори и много др.). Това са устройства и елементи, които не могат да се измерват самостоятелно и е необходима специална помощна измерителна “фикстура” (“in-fixture” измервания). Тук сложността идва от факта, че равнините на калибровка и измерване не съвпадат, както е при устройствата с корпус. Тогава трябва математически да се извърши “екстракция” на параметрите, т. е. да се “премести” равнината на калибровка “навътре” във фикстурата към входовете на самото устройство (вж. долу). С анализатора на вериги се измерва S -матрицата S_{meas} на цялата фикстура. Ако се определят S -матриците на подвеждащите линии във фикстурата S_{\rightarrow} и S_{\leftarrow} (чрез измерване или симулация) може да се определи S -матрицата S_{DUT} на самото устройство. Друг начин е да се използват специален тип калибровки (вж. следващите страници), които да “преместят” измерителната равнина, като сега именно собствените параметри на устройството се изобразяват на дисплея.



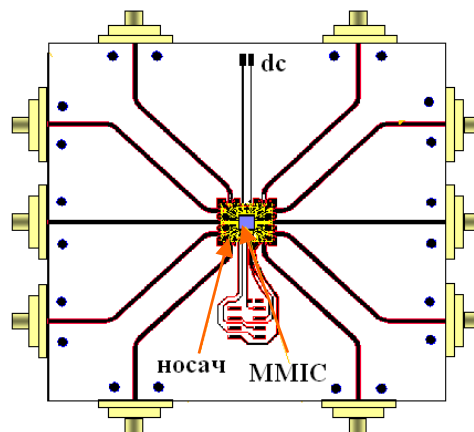
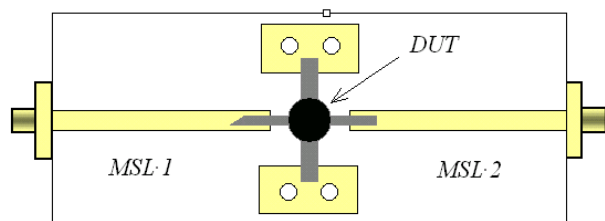
Измерителни фикстури за “in-fixture” измерване



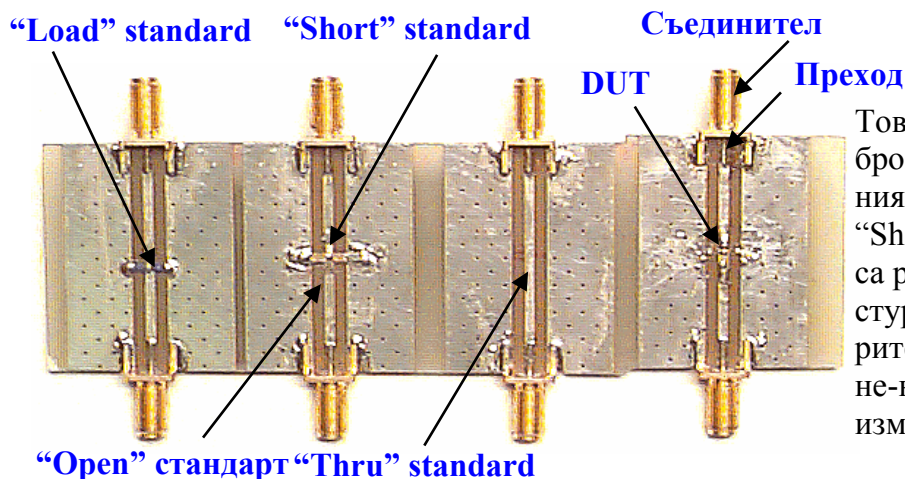
DUT

Показани са няколко примера:

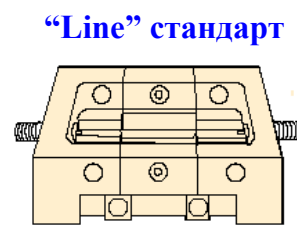
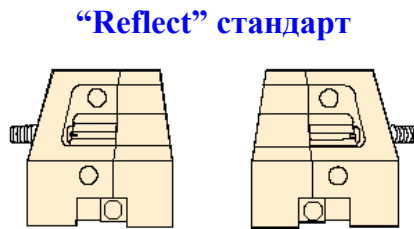
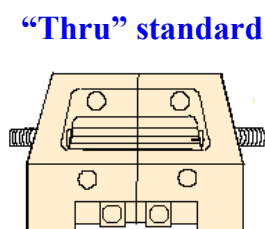
- горе: оригинална Agilent измерителна фикстура за полеви транзистори; долу: проста измерителна фикстура за полеви транзистори свързване “общ source”;
- горе-вдясно; микролентова структура за измерване на чип-кондензатор;
- долу вдясно; сложна 10-раменна измерителна фикстура за ММІС върху носач



Калибровки за in-fixture измерване



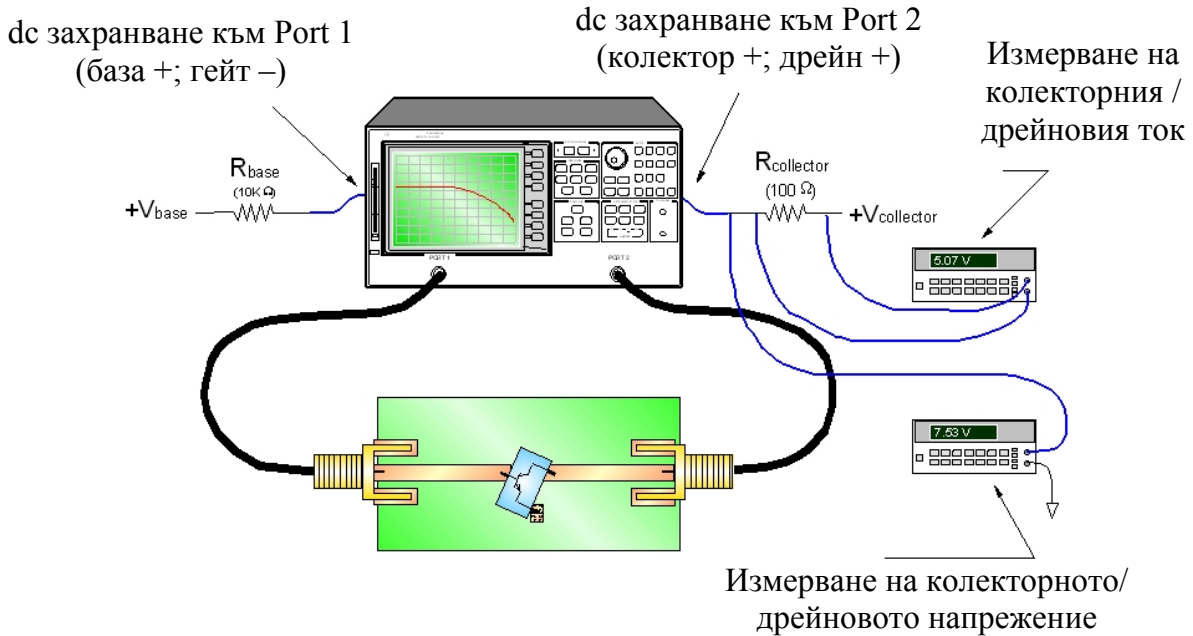
Това е специална SOLT калибровка за “in-fixture” измервания. При нея стандартите “Short”, “Open”, “Load”, “Thru” са разположени вътре във фикстурата и специфицират измерителната равнина директно на не-коаксиалните входове на измерваното устройство.



Това е друга разпространена калибровка за “in-fixture” измервания: TRL, състояща се от стандартите “Thru”, “Reflect” и “Line”. Това е доста по-проста от SOLT калибровка, но достатъчно ефикасна. Фазовата разлика между “Thru” и “Line” стандартитр трябва да е $\sim \lambda/4$. Сега измерителната равнина се специфицира в средата на стандарта “Line”.

Измерване на активни устройства с VNA чрез подаване на напреженията през измерителните кабели

При измерване на активни устройства има важна специфика: към тях обикновено трябва да се подадат определени dc напрежения (dc bias). Това може да стане чрез специални “пътечки” на измерителната ”in-fixture” платка. Ако така не е възможно, съвременните анализатори на вериги предвиждат това да стане и през измерителните кабели на двата входа (2 едно- или двуполярни “-” / “+” напрежения). Последното е илюстрирано на фигурата.

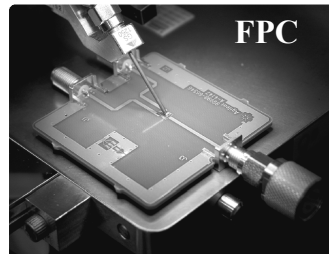
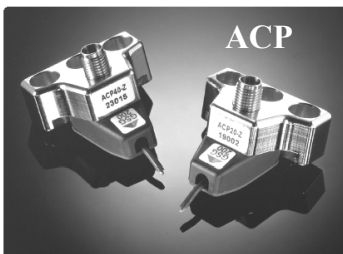
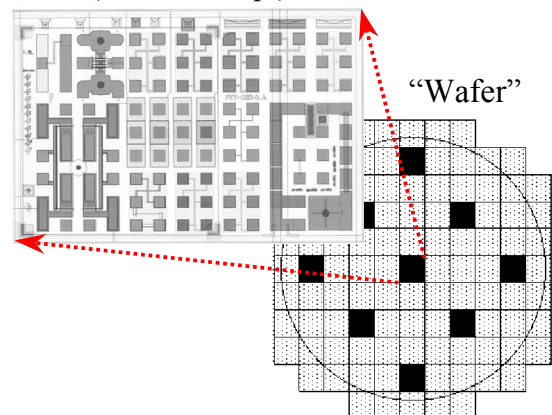


Сондови “on-wafer” измервания

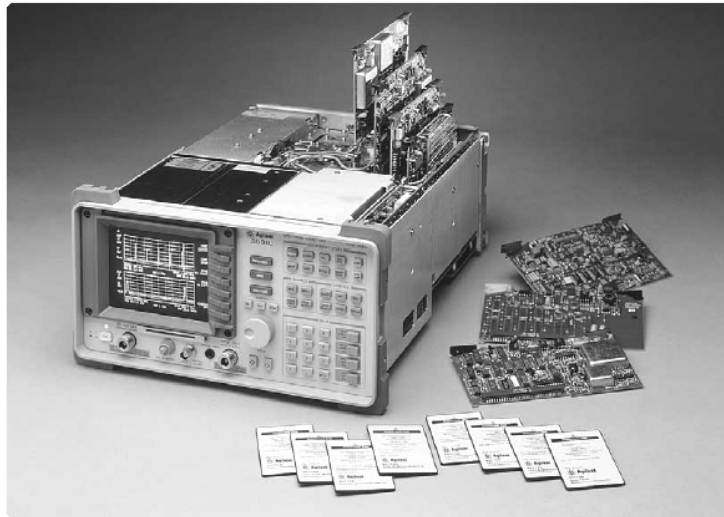
Много важна възможност на съвременната измерителна техника е да се изследват миниатюрни устройства (напр. интегрални схеми), без да се отделят от полупроводниковата подложка, върху която са произведени – “on-wafer” измервания. Това става със специален тип измерителни сонди за надеждно подвеждане на сигнала. Самите сонди представляват въздушен копланарен вълновод (ACP, Air-Coplanar probe) за по-високи честоти: една средна сигнална шина и две странични заземени шини. Друг тип сонди са единичните “пинове” за по-ниски честоти и за dc напрежения (FPC, Fixed-Pitch Compliant). И двата типа сонди имат размери от 150 до 1250 μm и позволяват прецизно позициониране. Предлагат се и много прецизни калибровъчни едно-входови стандарти ISS (Impedance Standard Substrates) и ENA Wafer Cal за много точни измервания.



Тестово устройство (LNA или др.)

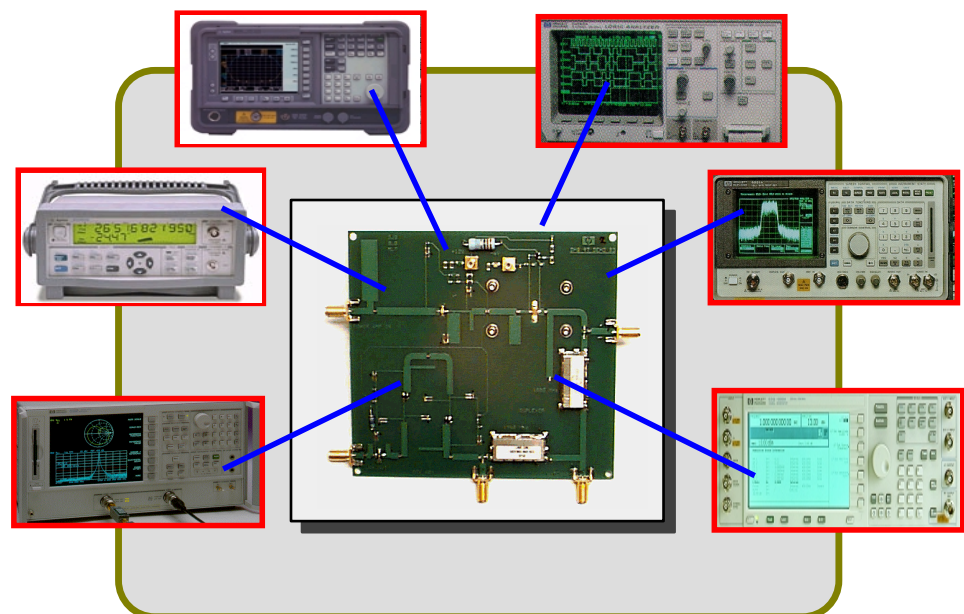
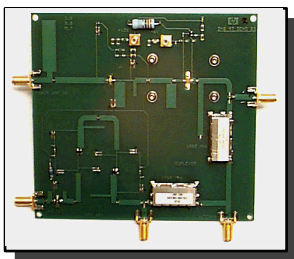


1.5 Микровълнови измерителни системи



Микровълнови измерителни системи

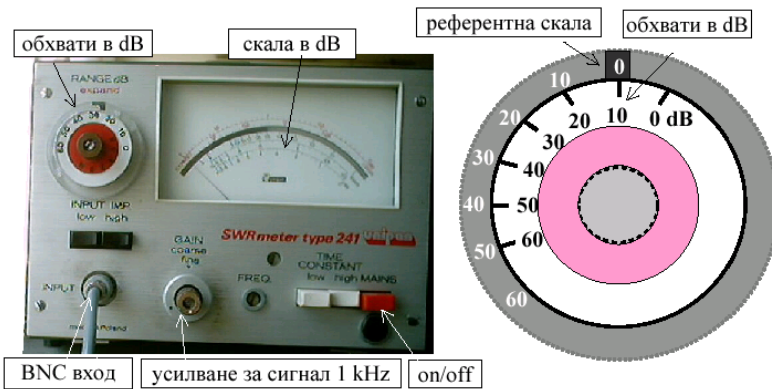
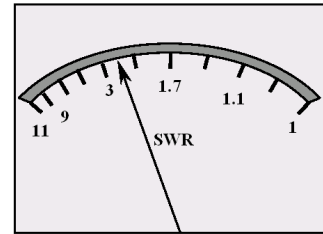
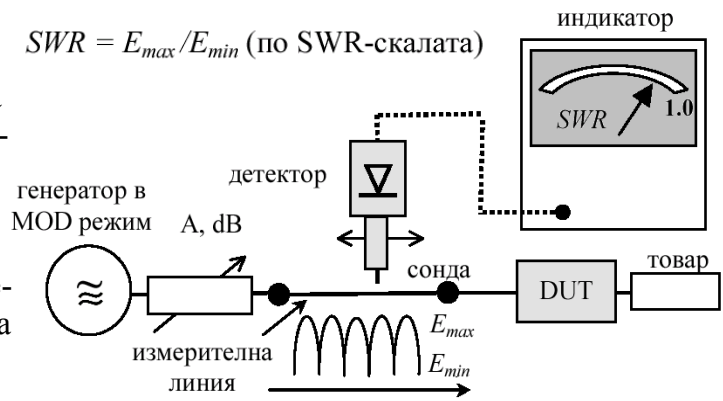
Измерителната система е съвкупност от управляемо измерително оборудване за реализация на автоматизирано измерване на комплект от параметри на устройства и сигнали. Когато имате проектирано устройство, най-добрият начин да проверите резултатът от своята работа е да измерите параметрите му с един универсален прибор, максимум с 2-3 прибора (S-параметри, спектър, шум). Повечето съвременни микровълнови измерителни прибори представляват системи (вж. примерите на следващите страници и в други лекции).



Най-прост пример за измерителна система: SWR метър

Това е една от най-простите измерителни системи: включва детектор, селективен волтметър за детектиран сигнал с честота на модулация ~ 1 kHz и стрелкови индикатор. Използва се за специализирано измерване на коефициент на стояща вълна SWR или коефициент на затихване в зависимост от схемата на свързване на детектора. При измерване на SWR се използва измерителна линия за снемане на нивата E_{min} и E_{max} на стоящата вълна ($SWR = E_{max}/E_{min}$), като се следи детекторът да остава в квадратичен режим (Лекция 2).

$$SWR = E_{max}/E_{min} \text{ (по SWR-скалата)}$$



Процедура на измерване на SWR: По измерителната линия се търси максимум и с потенциометъра се нагласява показание "1". После се търси съседен минимум. Показанието в този минимум, отчетено по SWR-скалата е числено равно на SWR на устройството.

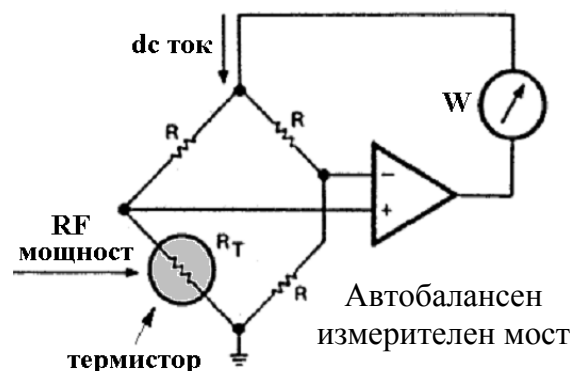
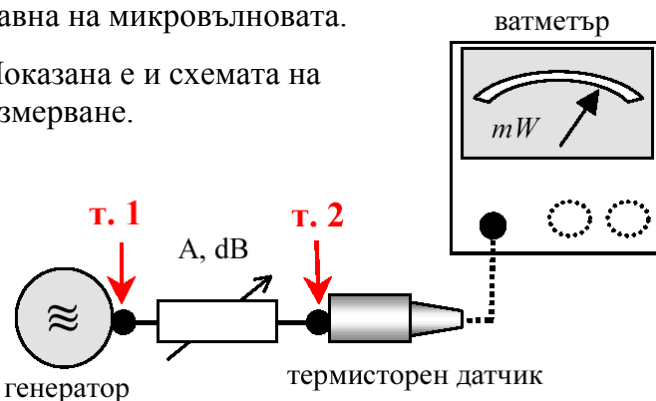
Друг пример: Ватметър с мостова схема

Ватметърът е една от най-старите микровълнови измерителни системи: специализирана мостова схема за измерване на микровълнова мощност. Включва: датчик - термисторна секция (една или повече за различни обхвати), автобалансиращ мост за измерване на съпротивлението на термистора (оттам и еквивалентната dc, респ. микровълнова мощност) и индикатор. Често има и вграден калибриран генератор с фиксирана мощност за настройка на измерителната скала. При измерването се използва специален тип модулация (вж. Лекция 2). Дори в аналогово изпълнение, схемата е много ефективна. Идеята е да се отчете показание за еквивалентната нисочестотна мощност (dc, rf), която е числено равна на микровълновата.



Ватметър TZA-075

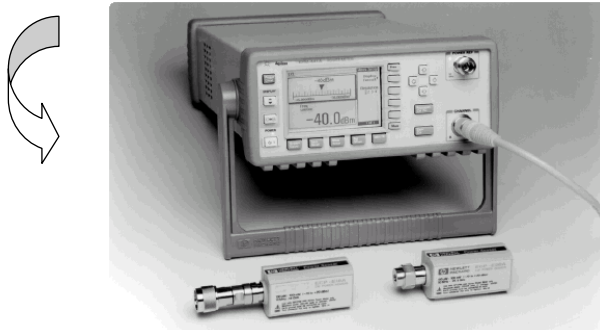
Показана е и схемата на измерване.



Основни микровълнови измерителни системи

❖ **Измерител на мощност (power meter)**: Днес ватметърът е едно от най-евтините микровълнови устройства, но пък затова не е особено универсално. Използва се единствено за прецизно измерване на абсолютна мощност от микровълнови източници: средна (CW), импулсна и пикова.

(Подробно е разгледан в Лекция 2)



Микровълнов ватметър

Микровълнов честотомер



❖ **Честотомер (таймер) (frequency counter-timer)**: Това е комбинирано устройство за измерване на честота на CW сигнали и носеща честота на модулирани сигнали; времеви интервали, изменение на честотата с времето (т. нар. “modulation-domain” измерване), времеинтервали за превключване на честотни синтезатори и др.

(Подробно е разгледан в Лекция 3)

Основни микровълнови измерителни системи (2)

❖ **Спектроанализатор (spectrum analyzer)**: Това е една от най-универсалните суперхетеродинни измерителни системи в микровълновия обхват и поради това едно от най-скъпите. Използва се главно за измерване на спектри на модулирани сигнали (80-90 % от случаите), както на аналогови модуляции (AM, FM, PM), така и на цифрови (ASK, FSK, PSK), включително и най-разпространените в съвременните комуникации (GMSK, QPSK, QAM) и пр. Използва се още за измерване на честота и честотни интервали, ниска и свръх-ниска абсолютна мощност на отделни спектрални съставящи на сигнала, фазов шум на осцилатори, за EMC/EMI измервания, антенни измервания и пр.

(Подробно е разгледан в Лекция 4)



Спектроанализатор



За полеви антенни измервания

Основни микровълнови измерителни системи (3)

❖ **Анализатор на вериги** (network analyzer, NA): Днес това са най-използваните съвременни измерителни системи в микровълновия обхват в две разновидности – скаларни SNA (използват се вече доста по-рядко; само за измерване на амплитуди на S-параметри) и векторни VNA. Последните са изключително универсални системи, но се използват главно за измерване на комплексни S-параметри на устройства в линеен режим и свързаните с тях величини като коефициенти на отражение и стояща вълна, входни импеданси, фазови и групови закъснения и пр. Анализаторът на вериги е линейно устройство (за разлика от спектроанализатора, който е нелинейно измерително устройство). Могат да се измерват както разнообразни пасивни устройства, така и по-голяма част от параметрите на активни устройства. Това е единствената система, която позволява и т.нар. TDR измервания (Time-Domain Reflectometry), за анализ на отделни части от устройствата, както и за откриване на разнообразни нееднородности по посока на разпространение на сигнала. (Подробно са разгледани в Лекция 5)



Анализатори на вериги

Основни микровълнови измерителни системи (4)

❖ **Измерител на коефициент на шум** (noise-factor meter; noise-figure meter): Това е измерителна система, специализирана за измерване на коефициент на шум, шумово число и шумова температура на активни устройства в широк честотен обхват по метода на “студеното” и “топлото” измерване. Важна част от системата е образцовият (калибриран) генератор на шум, който се използва само при този вид измервания. Измерителят на шум е всъщност система за измерване на честотната зависимост на коефициента на шум, като в добавка може да измерва и коефициент на усилване (“available gain”).

(Подробно е разгледан в Лекция 6)



Измерител на шум

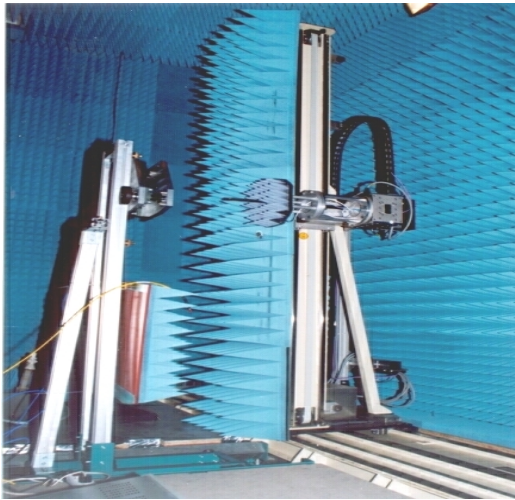


Генератор на шум

Други микровълнови измерителни системи (5)

❖ **Измерителни комплекси за антени:** Това са автоматизирани измерителни комплекси: “безехови” камери; “near-field” скенери; открити измерителни полигони и пр. за антенни измервания: диаграма на насоченост, коефициент на насочено действие и пр.

(Подробно са разгледани в Лекция 8)

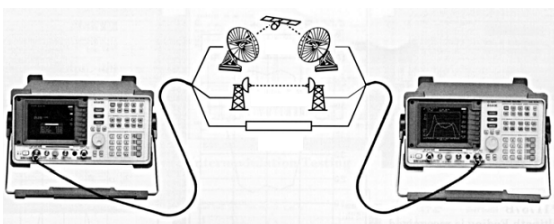


❖ **Системи за EMC/EMI измервания:** Това са специализирани прибори за оценка и измерване на плътността на потока на мощността в антени полета около излъчващи устройства, специфична абсорбирана мощност (SAR) и др. с оглед на изпълнение на стандартите за ограничаване на електромагнитната интерференция между устройства.

(Подробно са разгледани в Лекция 9)

Други микровълнови измерителни системи (6)

❖ **Разнообразни комуникационни измерителни системи**



Link анализатори



Тестови системи за цифрово радио



C/N тест системи



BER анализатори



Системи за активни T/R устройства



Сигнални анализатори