

高周波測定の基本

ROHDE & SCHWARZ

Make ideas real



本日の内容

- ▶ 高周波とは
- ▶ インピーダンス整合
- ▶ 高周波で考慮すべきこと
- ▶ デシベル
- ▶ コネクタの種類
- ▶ 高周波測定で使用される測定器

高周波とは

高周波(RF)はどこで使われているのか



周波数と波長

周波数(f) : Hz

波長(λ) : m

伝播速度(v) : m/sec

[光速(C) : 2.99792458e8 m/sec]

周期(T) : sec

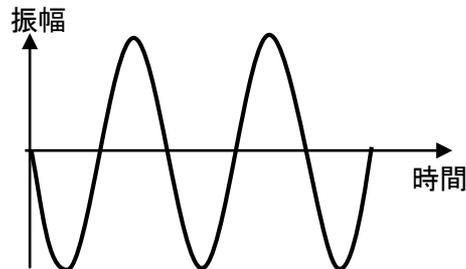
波長と周波数の関係

$$\lambda = \frac{C}{f}$$

$$\text{波長} = \frac{30}{\text{周波数 [GHz]}} \text{ [cm]}$$

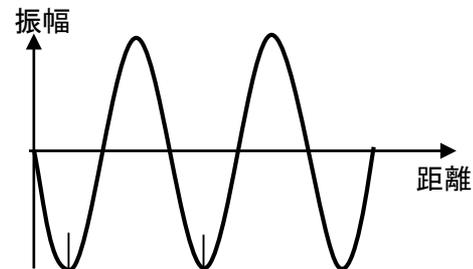
周波数と波長の近似式 ……

1GHz => 30 cm



1秒当たりの波の数

周波数



波ひとつ分の長さ

波長

高周波の定義

直進性:弱

情報伝送容量:小



直進性:強

情報伝送容量:大



周波数 範囲	10kHz	30kHz	300kHz	3MHz	30MHz	300MHz	3GHz	30GHz	300GHz
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	30kHz	300kHz	3MHz	30MHz	300MHz	3GHz	30GHz	300GHz	3THz
分類	超長波 VLF	長波 LF	中波 MF	短波 HF	超短波 VHF	極超短波 UHF	マイクロ波 SHF	ミリ波 EHF	サブミリ波

IEEEの分類

周波数 範囲	-	0.2GHz	0.25GHz	0.5GHz	2GHz	4GHz	8GHz	12GHz	18GHz	26GHz	40GHz	75GHz
	0.2GHz	0.25GHz	0.5GHz	1.5GHz	4GHz	8GHz	12GHz	18GHz	26GHz	40GHz	75GHz	111GHz
分類	Lバンド	Gバンド	Pバンド	Rバンド	Sバンド	Cバンド	Xバンド	Kuバンド	Kバンド	Kaバンド	Vバンド	Wバンド

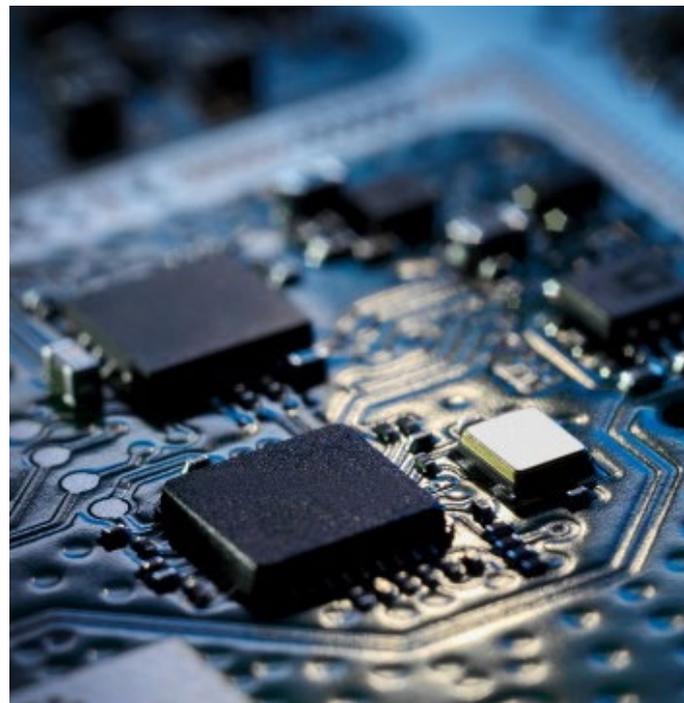
高周波の特長

▶ データレートの高速化

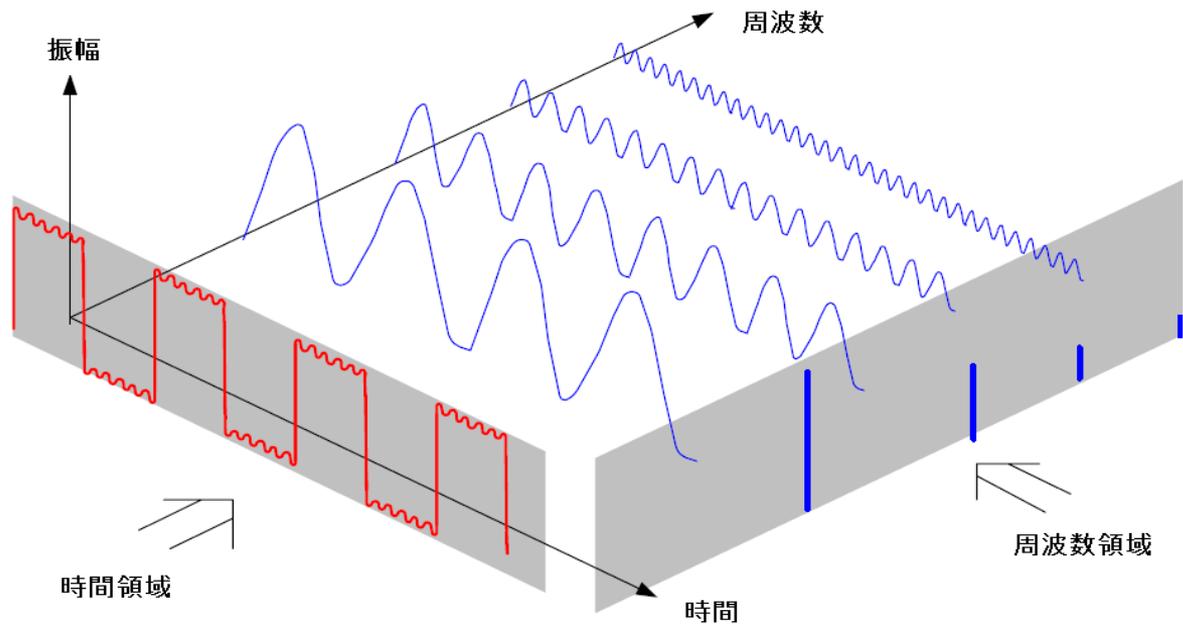
- クロックレートが高い方がより大容量の情報を送れる

▶ 部品の小型化

- コイルやコンデンサ、アンテナの小型化が実現できる



周波数領域と時間領域



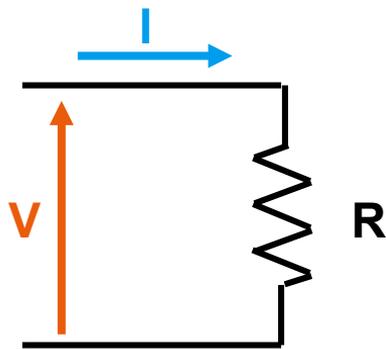
高周波の注意点

- ▶ 直進性が高いため、障害物があると到達できない
- ▶ 遠くに届かない
 - 電気損失が大きい
- ▶ 反射が大きい

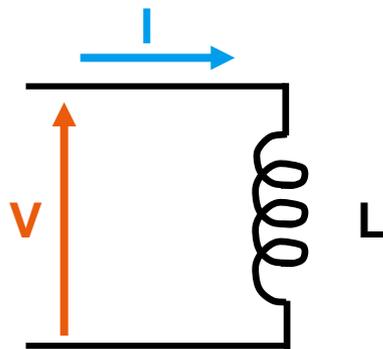
高周波のメリットデメリットのバランスを
取った設計が必要

インピーダンス整合

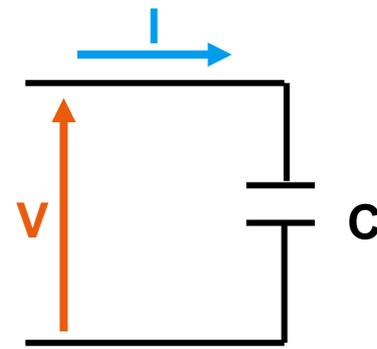
複素インピーダンス



$$V = I \times R$$



$$V = I \times j\omega L$$



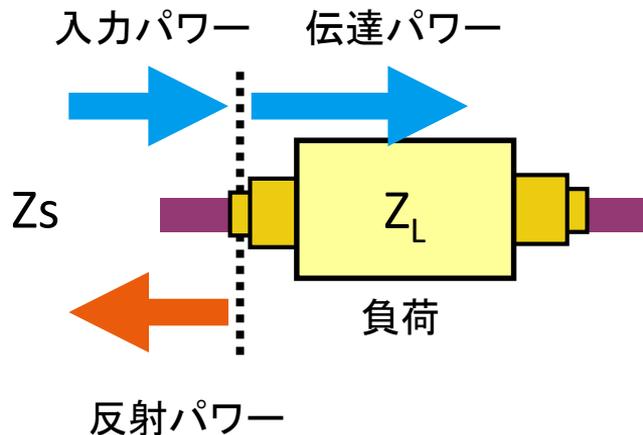
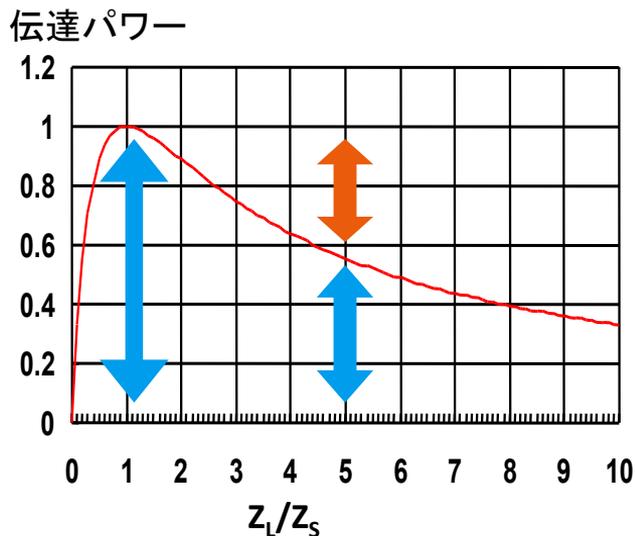
$$V = I \times \frac{1}{j\omega C}$$

$$V = I \times \mathbf{Z} \text{ (複素インピーダンス)}$$

$$\omega = 2\pi f$$

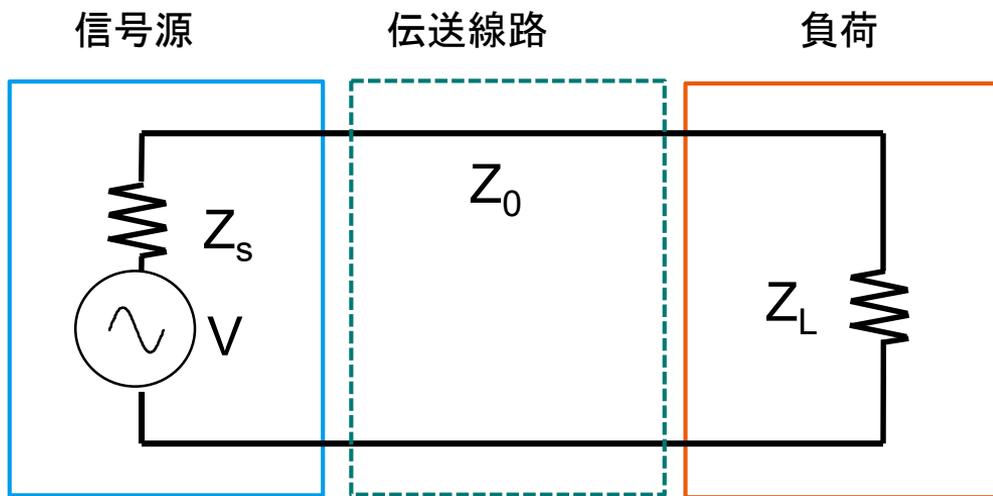
インピーダンス整合

- ▶ インピーダンスが同一であれば、信号は最大限伝わる



$$\text{最大伝達パワー} = (\text{入力パワー}) - (\text{負荷でのエネルギー消費})$$

伝送線路のインピーダンス整合



信号が負荷まで伝送するためにはインピーダンス整合が取れている必要がある

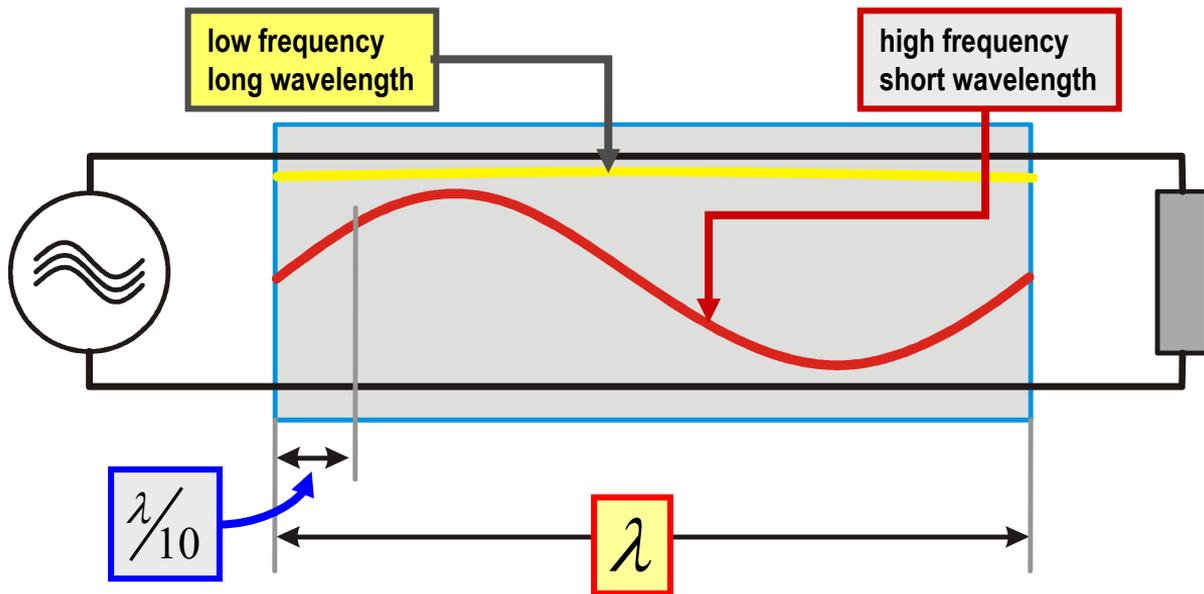
高周波回路で考慮すべきこと

高周波回路で考慮すべきこと

- ▶ 伝送線路の位相
- ▶ 寄生リアクタンス
- ▶ 誘導
- ▶ 放射

高周波回路での位相

▶ 同じ長さのパターンでも伝送する信号の周波数によって入出力間の位相差は異なる

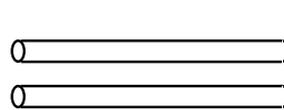


- Ⅰ 伝送線路の物理長が信号の波長 λ に対して十分短い場合、入口と出口で電圧は一定とみなせる
- Ⅰ 伝送線路の物理長が $\lambda/10$ を超える場合、入口と出口で電圧は異なる → 伝送線路は電流、電圧を変動させる素子として考える！

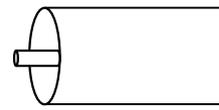
分布定数回路と等価回路モデル

▶ 集中定数回路

- 信号が伝搬する遅延時間が無視できる
- どこで測定しても特性は同じ



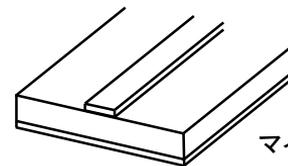
平行導線



同軸線路

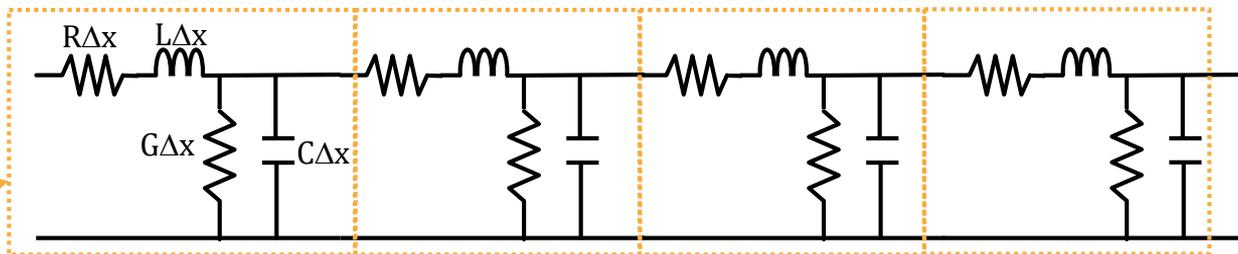
▶ 分布定数回路

- 測定場所によって特性が異なる
- 回路素子が無数に分布していると考える



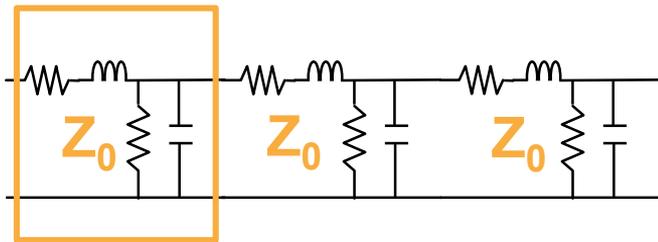
マイクロストリップライン

等価回路



特性インピーダンス

各等価回路のインピーダンスは整合が取れている → 信号が伝わる



伝送線路の特性インピーダンス

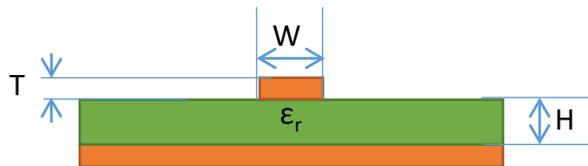
$$Z_0 = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + j\omega C)}} \quad [\Omega]$$

$\omega = 2\pi f$

無損失の場合

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad [\Omega]$$

マイクロストリップライン(MSL)の特性インピーダンス

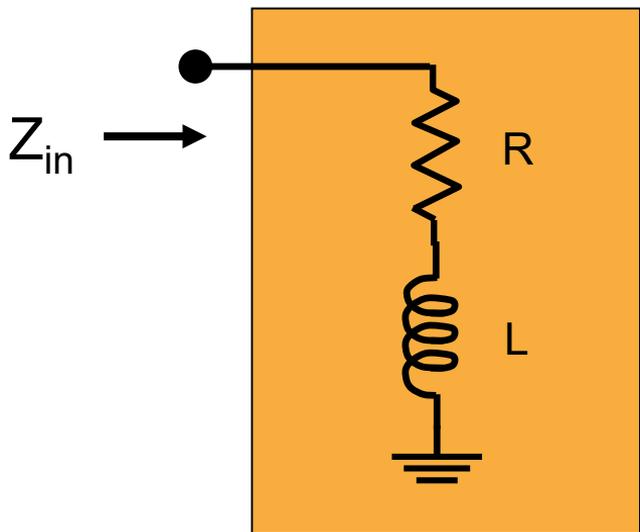


$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \ln \left(\frac{5.98 \times H}{0.8 \times W + T} \right) \quad [\Omega]$$

但し、 $0.1 < W/H < 3$ 、 $1 < \epsilon_r < 15$

リアクタンスの影響

- インピーダンスは周波数によって変化する



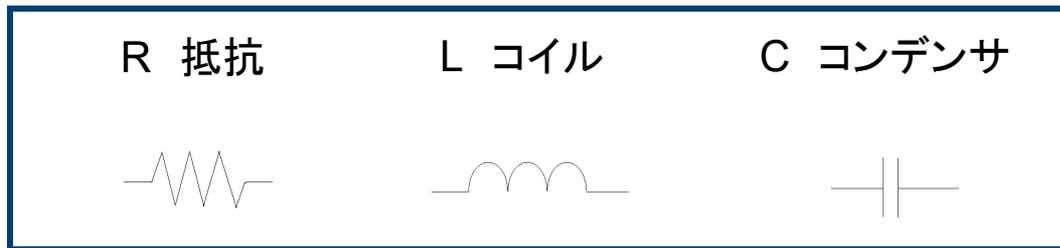
$$Z = R + j (\omega L - 1 / \omega C) \\ = R + jX$$

低周波: $Z_{in} \doteq R$

高周波: Z_{in} はインダクタンス
の影響を受ける

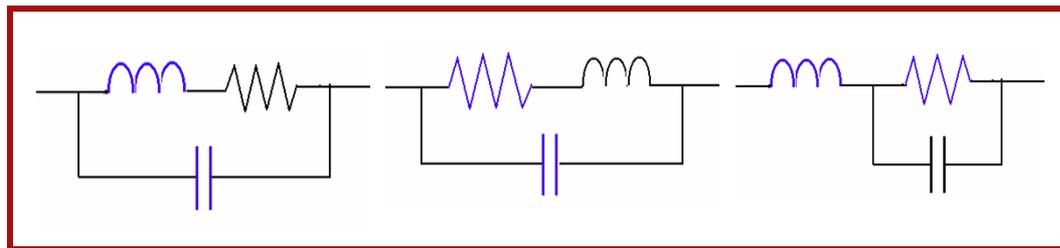
回路素子モデルの寄生リアクタンス

低周波



ひとつの素子として考えることができる

高周波

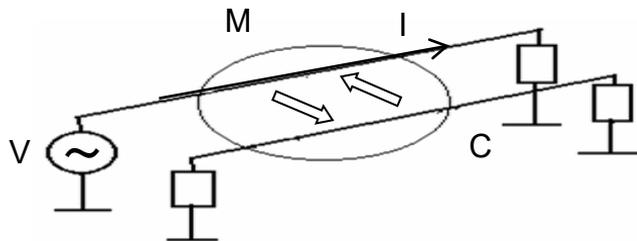


寄生素子を見捨てるできない

その他の影響

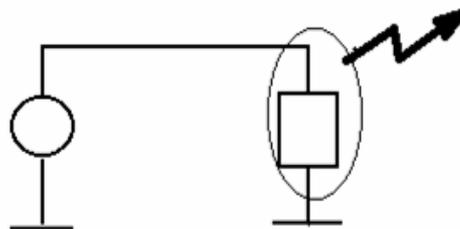
▶ 誘導

- 隣接した回路間の電氣的結合
- 電気容量、相互インダクタンス
- 他回路にノイズとして影響を及ぼす



▶ 放射

- 波長の長さが回路長に近づくと、回路自身がアンテナとなって電波を放射、受信



高周波回路で考慮すべきこと まとめ

- ▶ 伝送線路の位相
 - 分布定数回路で考える
- ▶ 寄生リアクタンス
 - 高周波では寄生素子の影響が増大
- ▶ 誘導
 - 隣接回路間での電氣的結合
- ▶ 放射
 - 回路のアンテナ化

インピーダンス整合を考えた設計

他回路への影響を考慮した部品の実装、レイアウト

使用する周波数と回路長の関係を考慮する

デシベル

dB、dBm、dBc

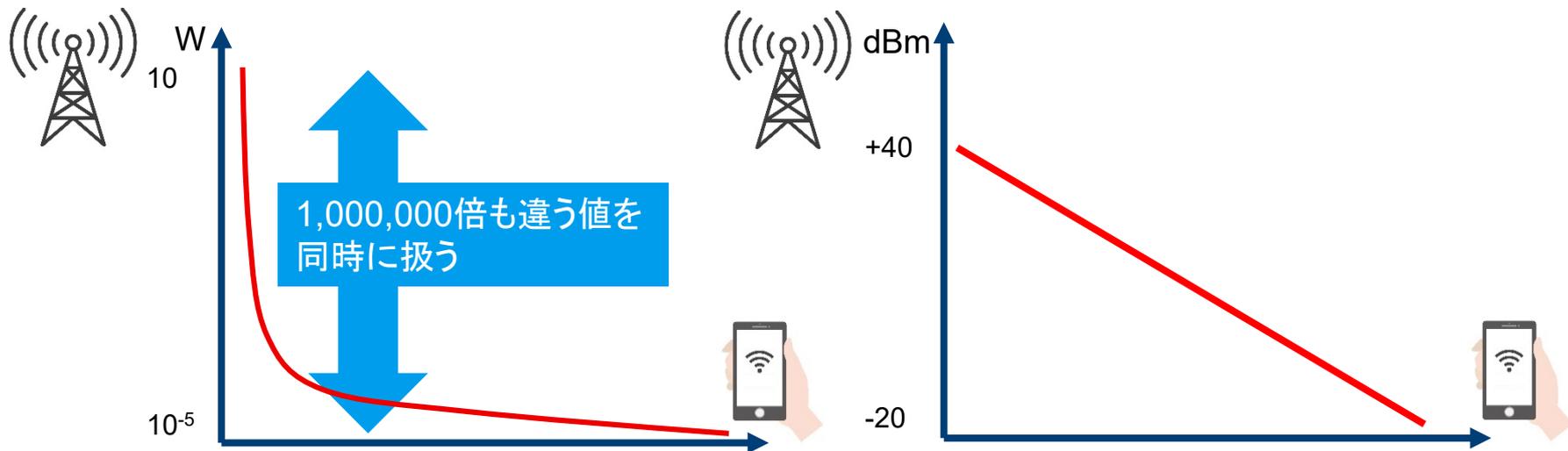
- ▶ dB
 - 電力及び電圧の比を対数で表す 相対値
- ▶ dBm
 - 1mWを基準とした 絶対電力値
- ▶ dBc
 - キャリア信号レベルを基準にしたときの 相対値
 - スプリアス測定などに使用

$$\begin{aligned} dB &= 10 \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \\ &= 20 \log_{10} \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} dBm &= 10 \log_{10} \left(\frac{P}{1mW} \right) \\ 0 \text{ dBm} &= 1mW \end{aligned}$$

デシベルのメリット

- ▶ 変化をとらえやすくなる
 - 大きく桁の違う数字を同じグラフで表現できる
 - 対数表示にすることで、微小な変動を拡大して表示できる



デシベルのメリット

▶ 大きな桁の変化を足し算引き算で表現できる

リニアだと...



デシベル
(ログ)だと...

-4.8dB + 15dB + -10dB + -8.5dB = -8.3dB

相互に変換できます: 54 dB がリニアの場合は?

54 dB = 20 dB + 20 dB + 20 dB - 3 dB - 3 dB

↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓

100 x 100 x 100 ÷ 2 ÷ 2 = 250,000 倍

デシベル (dB) と電力値 (dBm)

▶「dBm」とは

相対比較である「dB」では絶対値である電力を直接的に表せなくて不便なので、「1mW」を基準とした時の「dB」の値を使うことにしました。
それが「dBm」です。

電力	dBm での表現
1000 mW	+30 dBm
1 mW	0 dBm
0.001 mW	-30 dBm

デシベル換算表

dBの換算表				
電力dB			電圧dB	
0dB	× 1		0dB	× 1
3dB	× 2		6dB	× 2
6dB	× 4		12dB	× 4
10dB	× 10		20dB	× 10
20dB	× 100		40dB	× 100
30dB	× 1,000		60dB	× 1,000
-3dB	× 1/2		-6dB	× 1/2
-6dB	× 1/4		-12dB	× 1/4
-10dB	× 1/10		-20dB	× 1/10
-20dB	× 1/100		-40dB	× 1/100
-30dB	× 1/1,000		-60dB	× 1/1,000

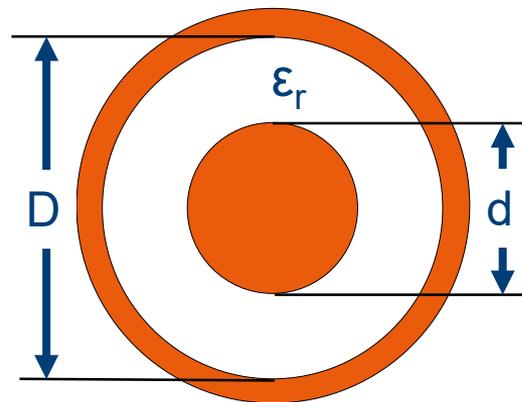
コネクタの種類

周波数とコネクタ

- ▶ コネクタやケーブルの特性インピーダンス、カットオフ周波数は、中心導体の外径(d)、外部導体の内径(D)、誘電体の比誘電率(ϵ_r)で決まる

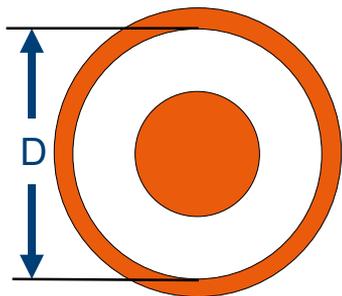
特性インピーダンス $Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{D}{d} \right)$ [Ω]

カットオフ周波数 $f_c = \frac{190}{(D+d)\sqrt{\epsilon_r}}$ [GHz]



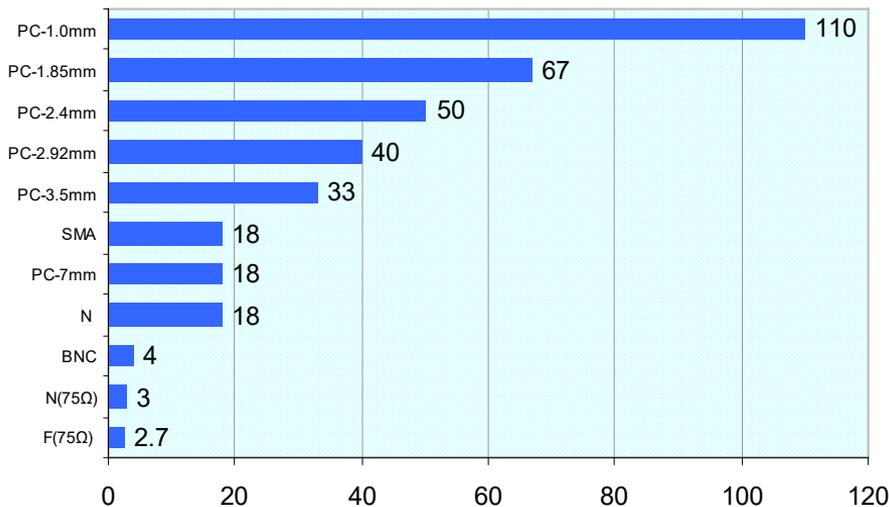
コネクタの種類と対応周波数

コネクタの周波数対応

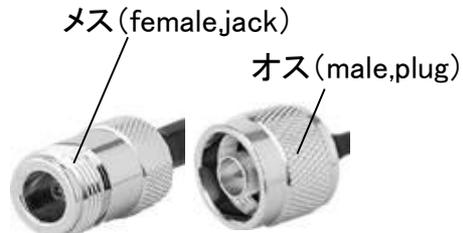


外部導体の内径がコネクタ名称になることが多い

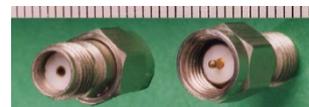
コネクタ・タイプ



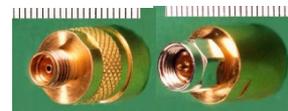
	F(75Ω)	N(75Ω)	BNC	N	PC-7mm	SMA	PC-3.5mm	PC-2.92mm	PC-2.4mm	PC-1.85mm	PC-1.0mm
■ 周波数(GHz)	2.7	3	4	18	18	18	33	40	50	67	110



Nコネクタ



SMAコネクタ



PC-3.5mmコネクタ



PC-2.92mmコネクタ

コネクタ互換性

SMA
PC-3.5mm
PC-2.92mm
(Kコネクタ)

PC-2.4mm
PC-1.85mm
(Vコネクタ)

注意点

上記のコネクタ群は直接接続可能です。
接続した場合、上限周波数は下位のコネクタの周波数範囲となります。

例)

SMAとPC-2.92mm(K)を接続した場合は、上限周波数が18GHzとなります。

コネクタ接続時の注意

- ▶ 手で締められるところまでは手で締める
- ▶ オスのナット側のみを回し、メス側は動かさない
- ▶ 最後にトルクレンチで締める



PC-7mm
N



SMA
PC-3.5mm
PC-2.92mm (K)
PC-2.4mm
PC-1.85mm (V)

どれくらいのトルクなのか？



コネクタの規格によって異なる

PC-7mm、N: 100~135N・cm

SMA、PC-3.5 / 2.92 / 2.4 / 1.85mm: 90~100N・cm

高周波測定で使用される測定器

各種測定に使用する測定器

項目	推奨する測定器
電力レベルの測定	パワーメータ スペクトラム・アナライザ
スペクトラム・スプリアスの測定	スペクトラム・アナライザ (オシロスコープ)
ノイズ測定	EMILシーバ スペクトラム・アナライザ (オシロスコープ)
デジタル変調解析	スペクトラム・アナライザ オシロスコープ
RFの信号源	信号発生器
電圧の測定	オシロスコープ マルチメータ
通過特性の測定	ネットワーク・アナライザ 信号発生器+スペクトラムアナライザ
インピーダンスの測定	ネットワーク・アナライザ

パワーメータ

- 高精度のパワー測定が可能
- パワーセンサと組み合わせて使用する
- パワーセンサ+PCで測定も可能
- 送信機のパワー測定や信号源の校正に使用
- 伝送・反射測定も可能(スカラーのみ)



信号発生器

- 信号を発生させる測定器
 - アナログ信号発生器 アナログ変調に対応 (AM、FM、パルスなど)
 - ベクトル信号発生器 デジタル変調に対応 (5G、LTE、WLAN、GPSなど)
- 出力する信号の周波数・レベルを変えることが可能
- フェージングをかけることが可能(ベクトル信号発生器の場合)



R&S®SMA100B (ASG)



R&S®SMW200A (VSG)



スペクトラム・アナライザ

- 周波数軸でのパワー測定を行う
- 電力レベル測定・周波数測定が可能
(レベル測定の精度はパワーセンサには劣る)
- RF信号を復調できるものをシグナルアナライザと呼ぶ
- 発振器の出力レベルや周波数の確認、信号の高調波や歪み、スプリアス測定、変調解析などに使用
- 瞬間的な変化を捉えられる、リアルタイムスペアナと呼ばれるものもある



R&S®FSW



R&S®FSVA3000



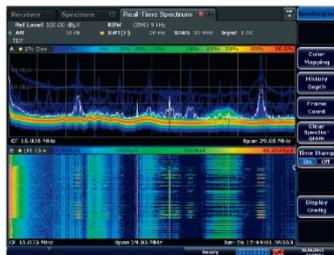
R&S®FSH

EMIレシーバ

- 測定対象から漏れだすノイズを測定する
- 基本的にはスペクトラム・アナライザと同様の測定を行える
- 外部の電波が遮断された、シールドルームで測定を行う
- 測定器のRF入力にアンテナをつけ、測定対象のノイズを測定



R&S®ESR



オシロスコープ

- 時間軸での電圧測定を行う
- 電気・電子回路の動作確認やデジタルインタフェース(USBなど)のバス解析に最適
- ミックスドシグナル解析機能を使用することで最高16チャンネルまでのロジック解析が可能
- 複数チャンネルを持ち、複数の電圧および周波数を同時に測定可能
- FFT処理のためリアルタイム性が高く間欠的なノイズ等の評価・原因の切り分けに適している
- 変調解析機能対応モデルではMIMO評価に最適(多チャンネル処理)



R&S®RTP



R&S®RTO



R&S®Scope Rider



ネットワークアナライザ

- 内部にCW信号源とレシーバを持っている
- 内部信号源は周波数掃引される(パワー掃引も可能)
- 信号をDUT(被測定物)に入力し、反射信号、伝送信号を測定する(Sパラメータ測定)
- 反射信号から、インピーダンス特性を知ることができる
- 測定前に、校正キットを用いた校正が必要



R&S®ZNA



R&S®ZNB



THANK YOU