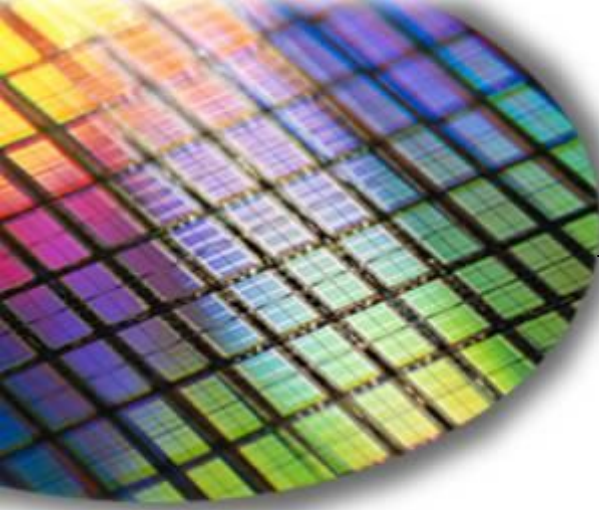




The World Leader in High Performance Signal Processing Solutions



高速アナログ回路技術の 基本を正しく理解して正しく設計する (後編)

アナログ・デバイセズ株式会社
石井 聡



アジェンダ

【前編】

1. イントロダクション
2. 「大きさ」を表すデシベル(dB)とdBmの考え方
3. dBmをちょっと基本クイズで考える
4. dBに関連して出てくる用語
5. 電圧と電流は伝送線路内を波として伝わっていく

【後編】

6. 伝送線路と特性インピーダンス
7. 電圧と電流が反射する「反射係数」
8. 低雑音設計で重要なNF(ノイズ・フィギュア)の理解
9. 実際のデータシートを引用した用語の意味合い



その1【前編】も
是非ご覧ください

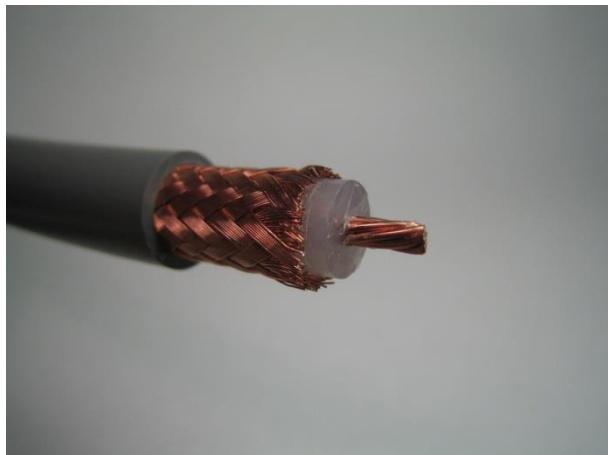


6. 高周波信号が伝わるときに考慮すべき 伝送線路と特性インピーダンス

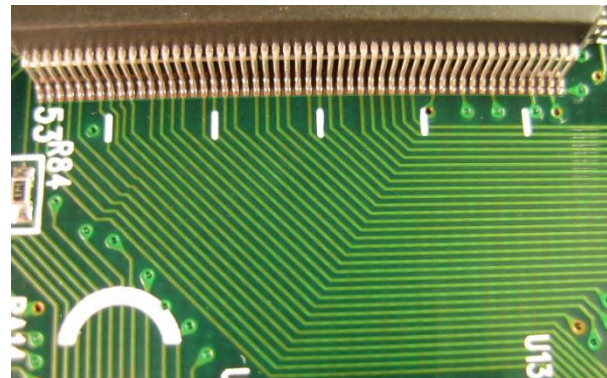
高周波信号は信号の変動(周波数)に対して、信号が伝わった経路(ケーブルやパターン; **伝送線路**)の**長さが無視できなくなります**。そのため経路上で信号を**波として考える**必要があります。

特性インピーダンスは信号を波と考えるときに必要な概念です。信号を「波」と考えることでうごきを理解できます。

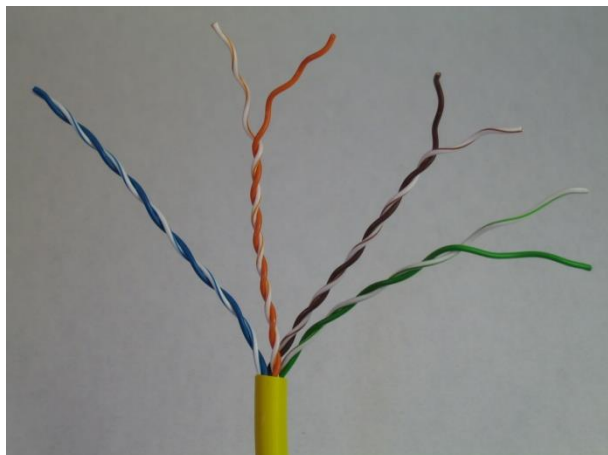
実際のケーブルやプリント基板は伝送線路



同軸ケーブル



高速デジタル信号のプリント基板
(最近は「インピーダンス・コントロール
基板」というものを使うことも多い)

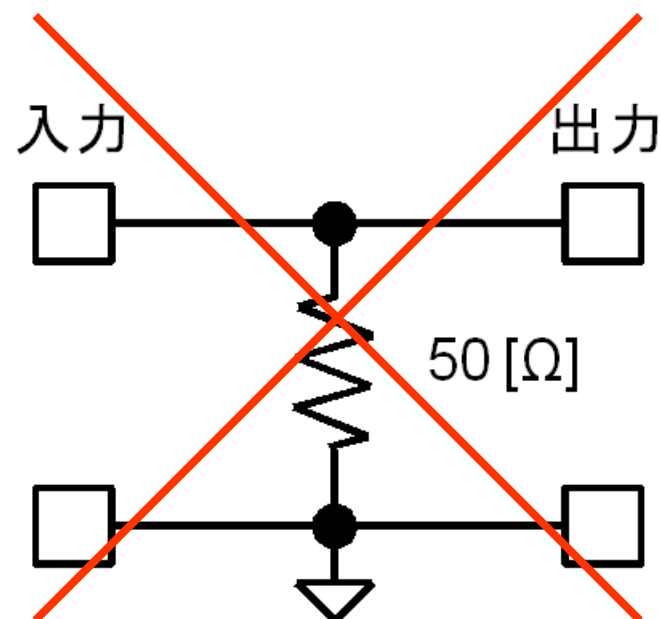
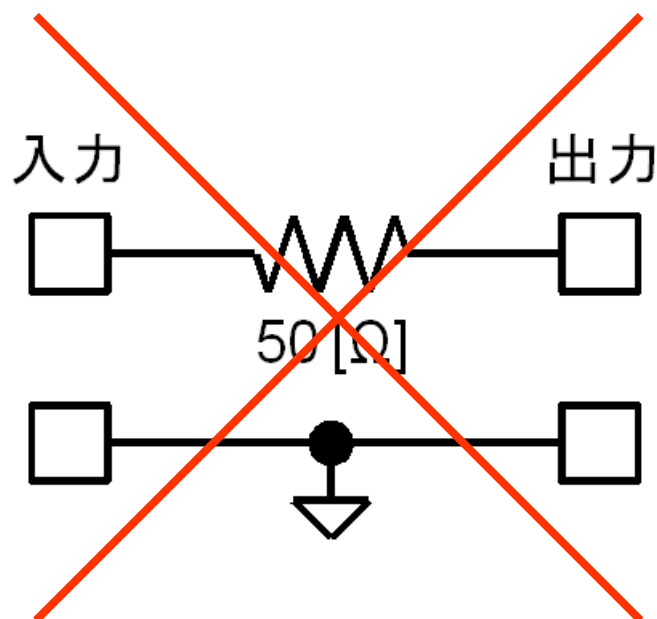


イーサネット・ケーブル



高周波回路(マイクロ・
ストリップ・ライン)

特性インピーダンス $Z = 50\Omega$ はこんなイメージでは無い



インピーダンス・コントロール基板の実例

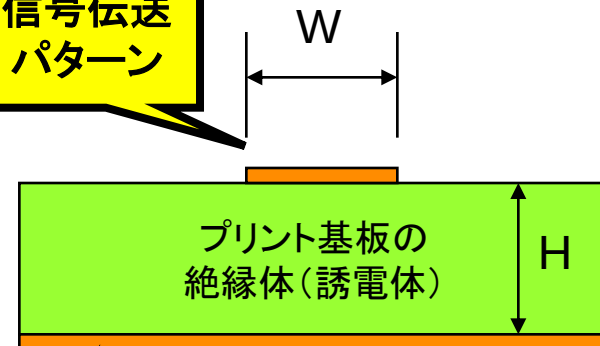
TDR測定ポイント

$Z_0=45 \ 200$
 $Z_0=50 \ 170$
 $Z_{diff}=90 \ 170/200$
 $Z_{diff}=100 \ 110/130$
 $Z_{diff}=100 \ 110/230$
 $L6 \ Z_0=50 \ 110$

インピーダンスコントロール基板の
テストクーポン(提供 甲斐エレクトロニクス)

基板の捨て部分に用意する写真のようなテストクーポンをTDR (Time Domain Reflectometer) 法と呼ばれる技術で測定し、その測定波形をもって正しい状態に基板が出来上がっているかを確認します

信号伝送
パターン



ベタパターン

特性インピーダンスは
 W と H と誘電率で決まります



なぜ特性インピーダンス、インピーダンスコントロールが必要か

◆ 以降に示していきますが...

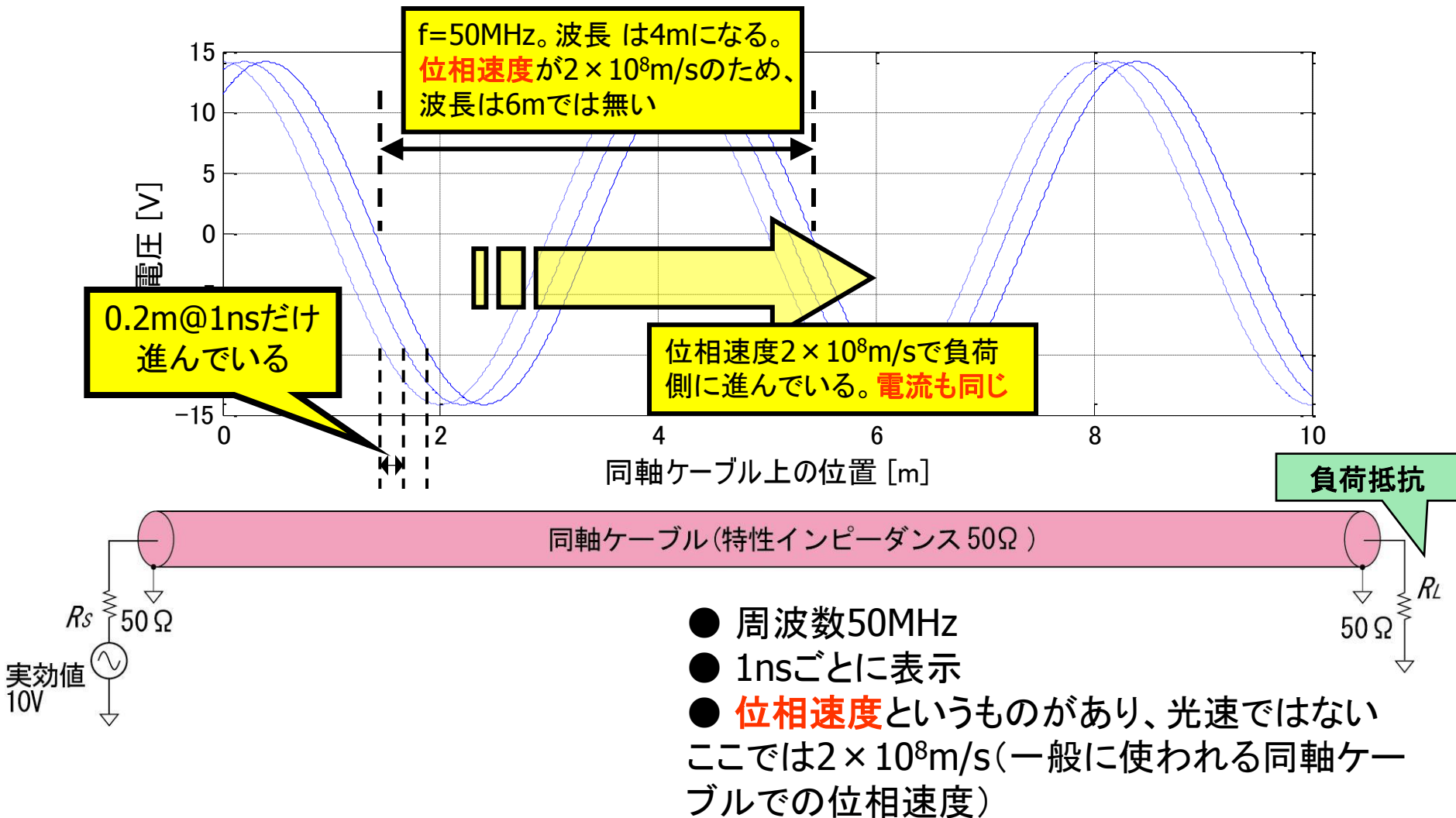
◆ 特性インピーダンスは

- 電圧と電流が「波」としてパターンやケーブルを伝わる
- このときの電圧と電流の一定関係
- ケーブル内部に抵抗成分があるわけではない

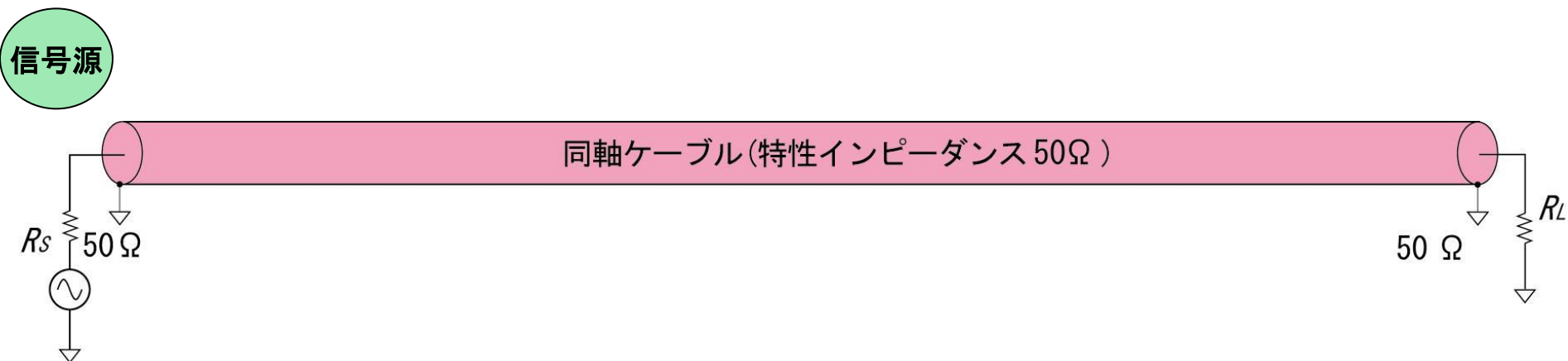
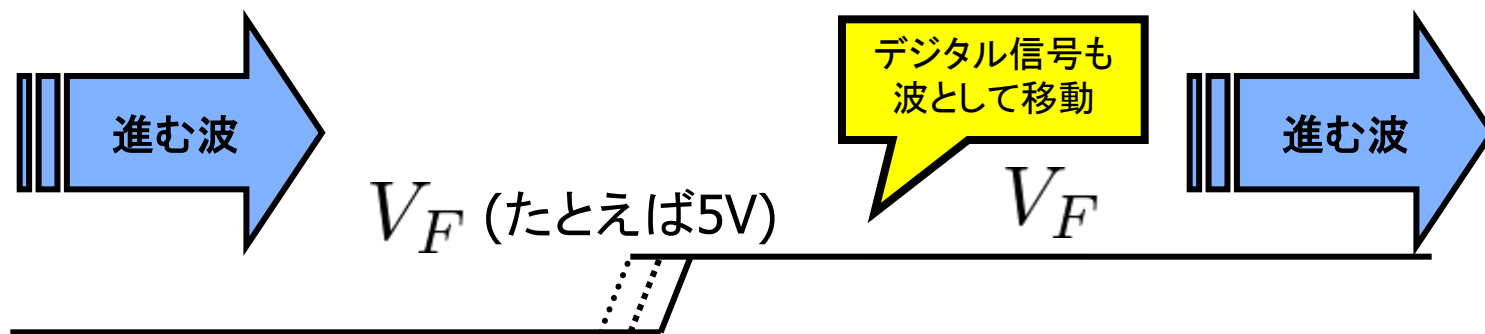
◆ 電圧と電流が「波」としてパターンやケーブルを伝わるので

- 特性インピーダンスと負荷抵抗の大きさが同じ(マッチング)していないと
- 負荷抵抗のところで電圧と電流の「波」が反射してくる
- つまり波形が乱れたり、きちんと電力を伝えられなくなる

電圧や電流は伝送線路内を波として移動していく



デジタル信号が伝わるようすも同様



信号が伝わるのはロープ上を波が伝わるのと同じ

イメージ実験をしてみましょう

Sec. 7の反射係数の様子もわかります

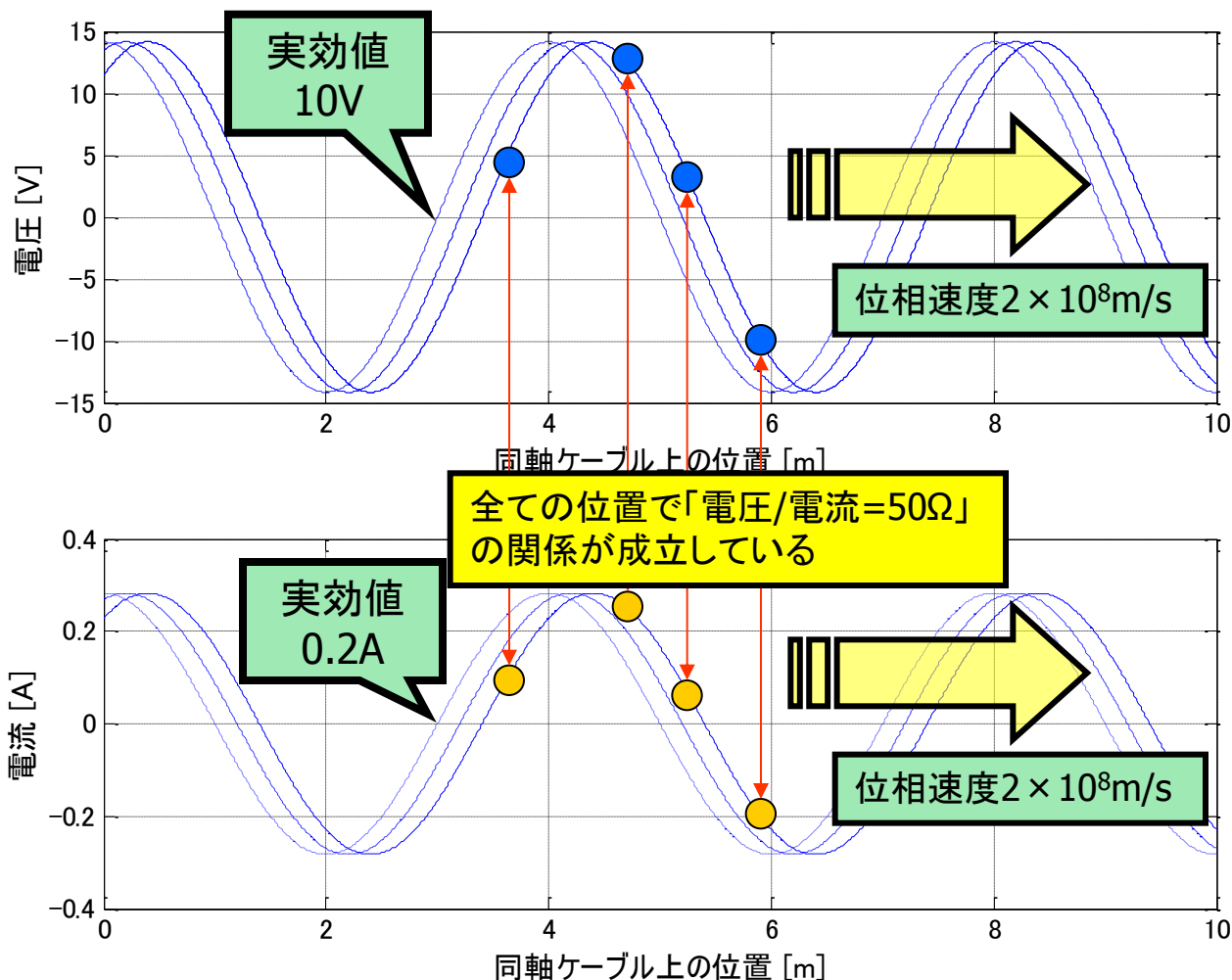
- ① ロープを**繰り返し振り**、波が伝わるようす(連続波)を確認します
- ② ロープを**ひと振り**して波が伝わるようす(パルス・デジタル信号)を確認します
- ③ ①および②から電気信号の伝わるようすを思い描いてみてください

線路内を10V, 0.2Aが伝わっていくのが特性インピーダンス50Ω

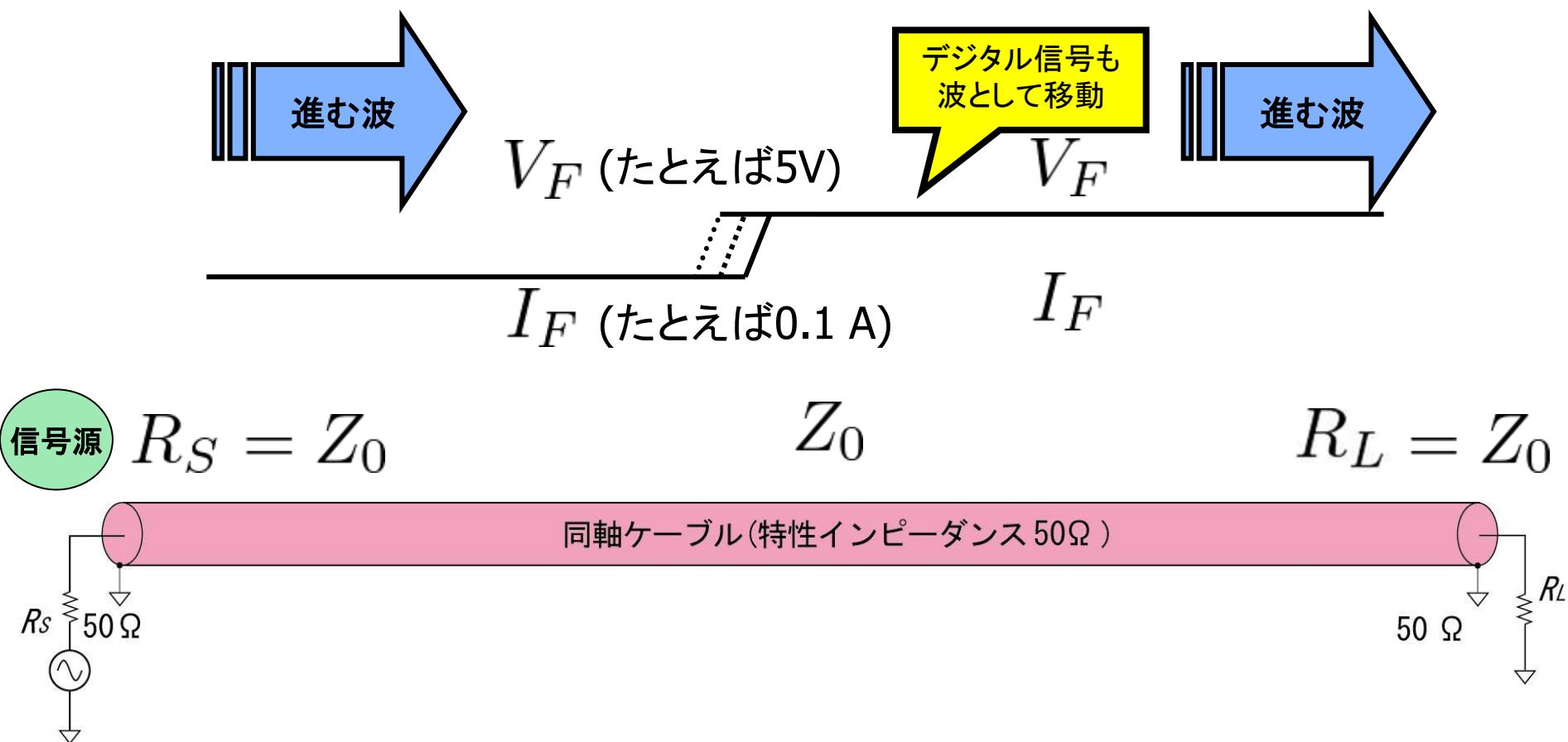
● 波として移動していく電圧と電流との相互関係(オームの法則)が特性インピーダンス

● 内部に50Ωの抵抗成分があるわけではありません

この図は周波数50MHz
横軸は位置[m]です！



デジタル信号の電圧と電流も特性インピーダンスで関連付けられる



特性インピーダンスに関連して出てくる用語

- ◆ インピーダンス: 抵抗素子+コイル+コンデンサの電流の流れにくさ
 - 抵抗素子では「抵抗量」と同じ
 - コイルは電流の流れにくさ(リアクタンス)は、周波数に**比例**
 - コンデンサは電流の流れにくさ(リアクタンス)は、周波数に**反比例**
 - 特性インピーダンスは、この「インピーダンス」から派生した用語
- ◆ 以下については次の章で説明します
 - 反射係数
 - Sパラメータ
 - ミスマッチ
 - スミスチャート



6. まとめ

電圧や電流は伝送線路内を波として移動していきます

波として移動していく電圧と電流との相互(オームの法則)関係が特性インピーダンス

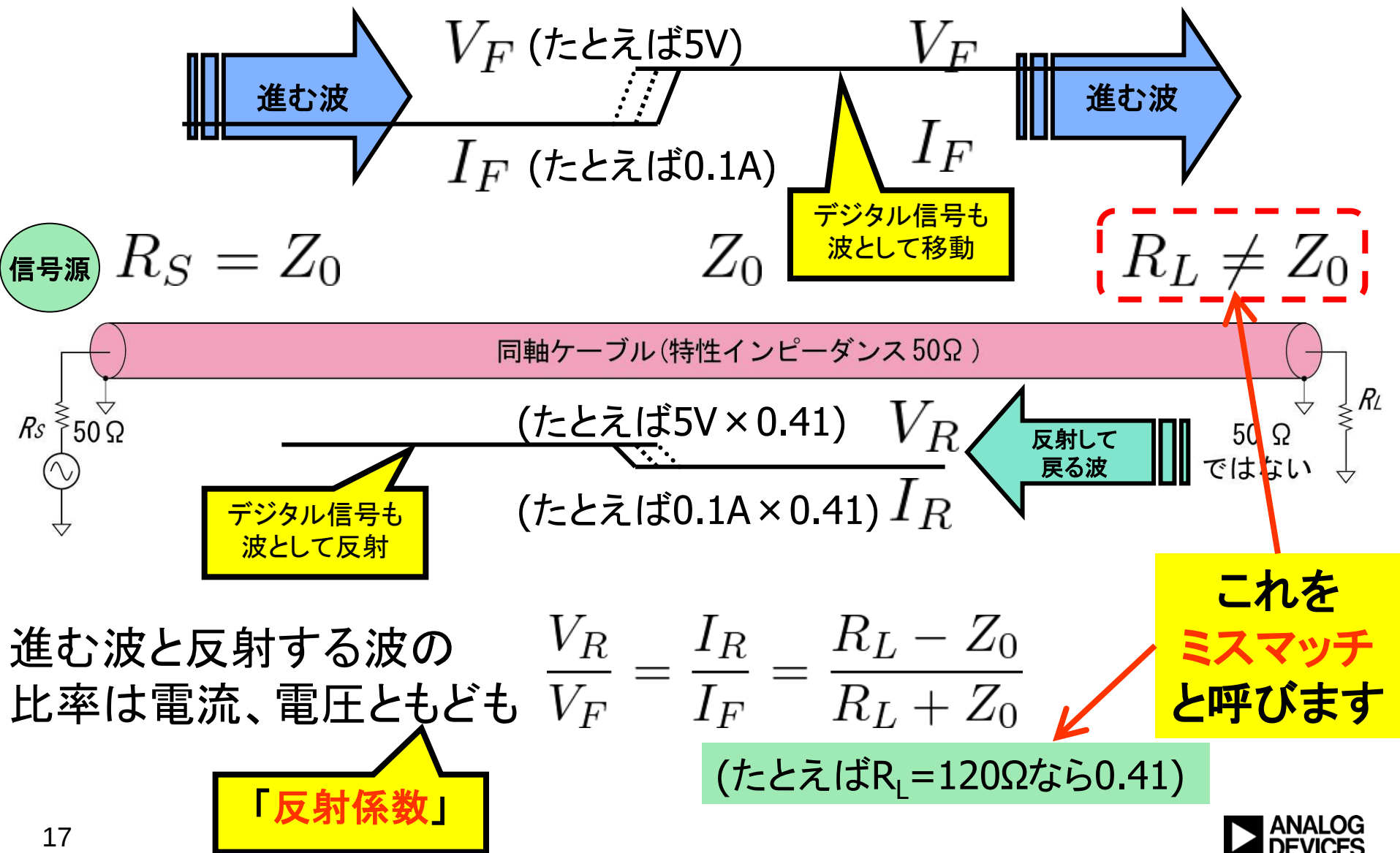


7. 負荷抵抗が合わない と電圧と電流が反射する・・・「反射係数」

高周波信号は信号(電圧・電流)の変動が伝わる速度に比べ早いので、信号が「波」として伝わります。

負荷抵抗を適切に処理(マッチングさせる)しないと、信号が反射してトラブルが生じてしまいます。信号の乱れのトラブルを、「波の反射」という理解で解決して頂ければと思います

反射のようすを最初はデジタル信号で図式的に理解する





信号の反射をロープ上を波が伝わるので実験してみる

イメージ実験をしてみましょう ②

① ロープを**繰り返し振り**、波が伝わるようす（連続波）と**反射**してくるようすを確認します

② ロープを**ひと振りして**波が伝わるようす（パルス・デジタル信号）と**反射**してくるようすを確認します

③ ①および②から電気信号の**反射**するようすを思い描いてみてください

連続した正弦波の進む波と戻る波の合成が各部の電圧と電流

10m = 2.5波長

同軸ケーブル (特性インピーダンス 50Ω)

R_s 50Ω

周波数 50MHz

信号源は
ピーク値2V

0.2m@1nsだけ
進んでいる

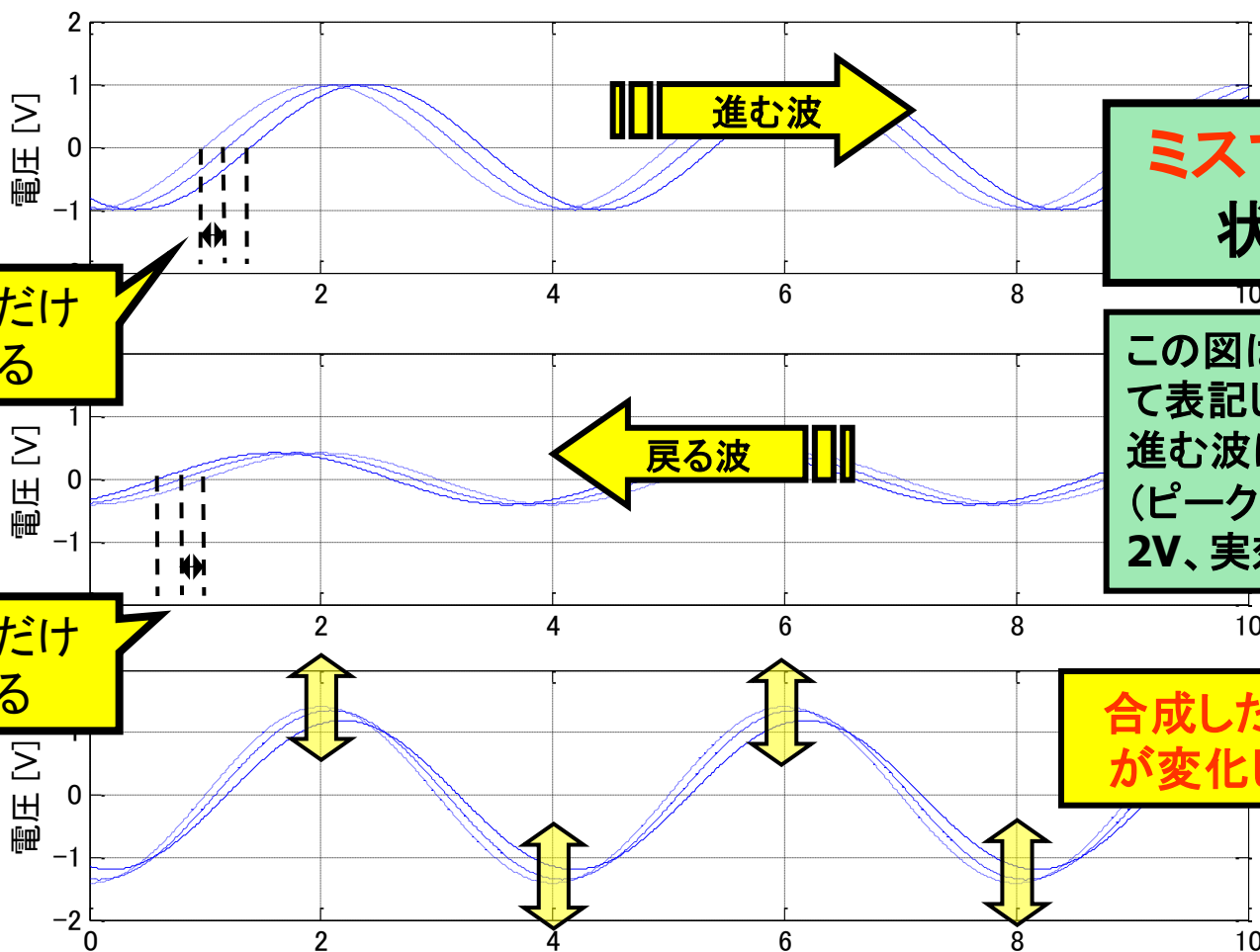
0.2m@1nsだけ
戻っている

R_L
 120Ω

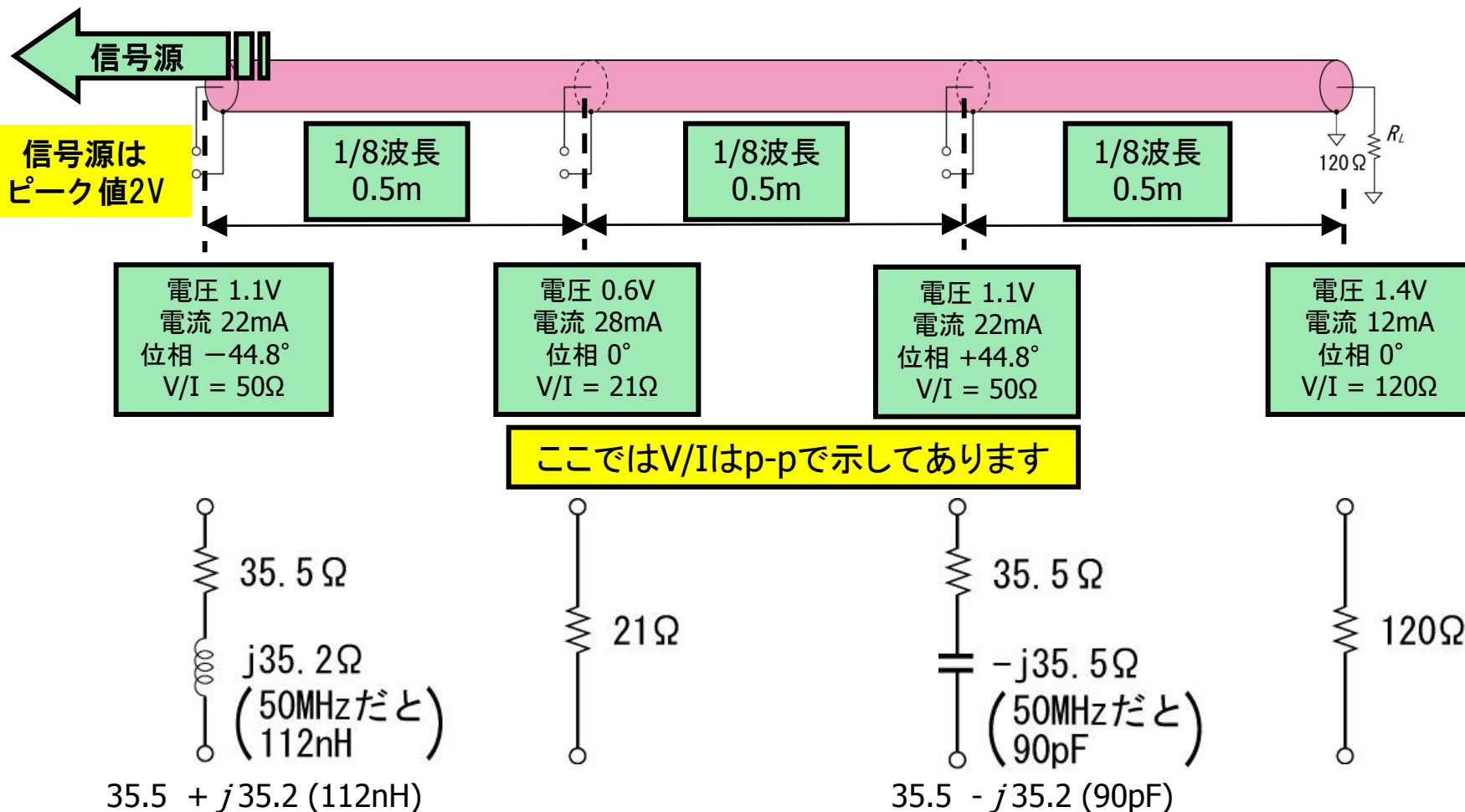
ミスマッチ
状態

この図は電圧を例にして
表記している
進む波は、ピーク値1V
(ピークからピークは
2V、実効値0.7V)

合成した波は振幅
が変化しています

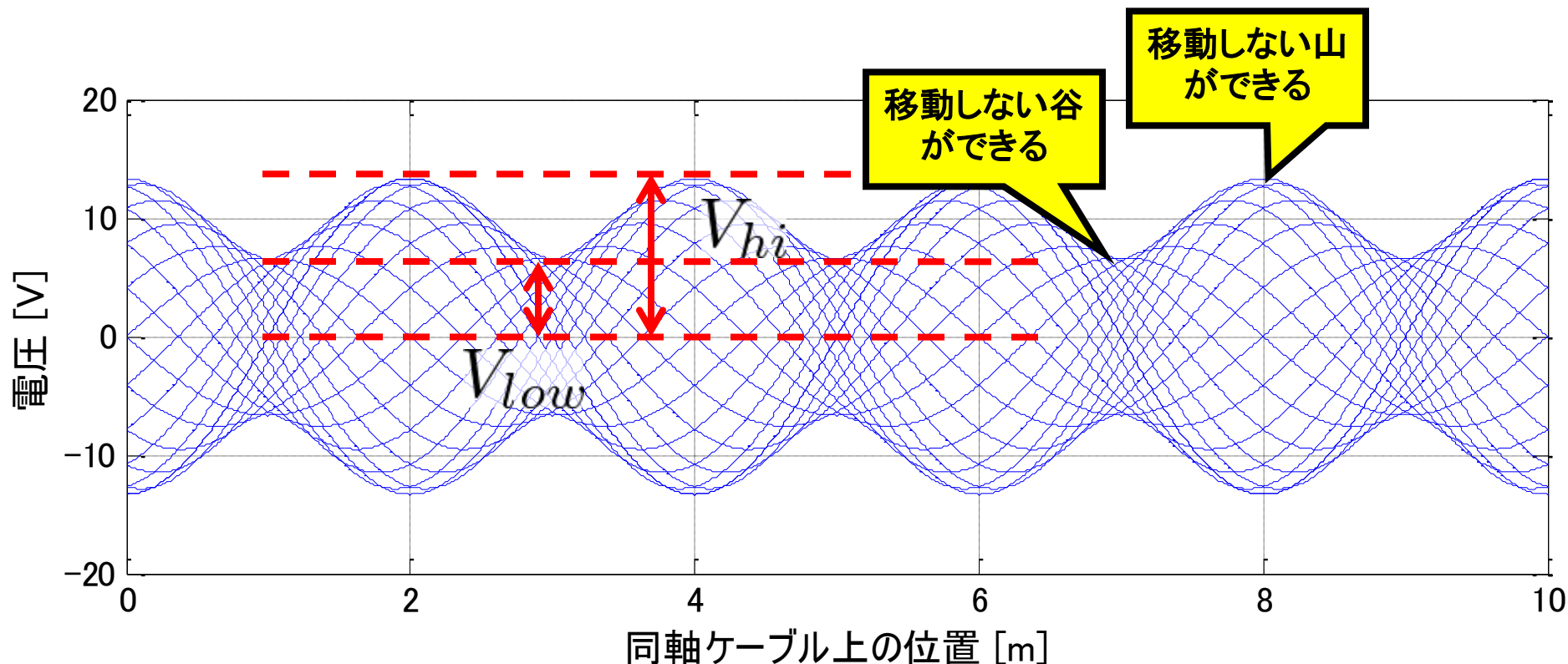


連続した正弦波では各ポイントごとの電圧、電流を見ると等価的な抵抗・コイル・コンデンサの回路に見える



周波数50MHzで考えている。位相は電流の位相。リアクタンスは周波数で変化するので注意

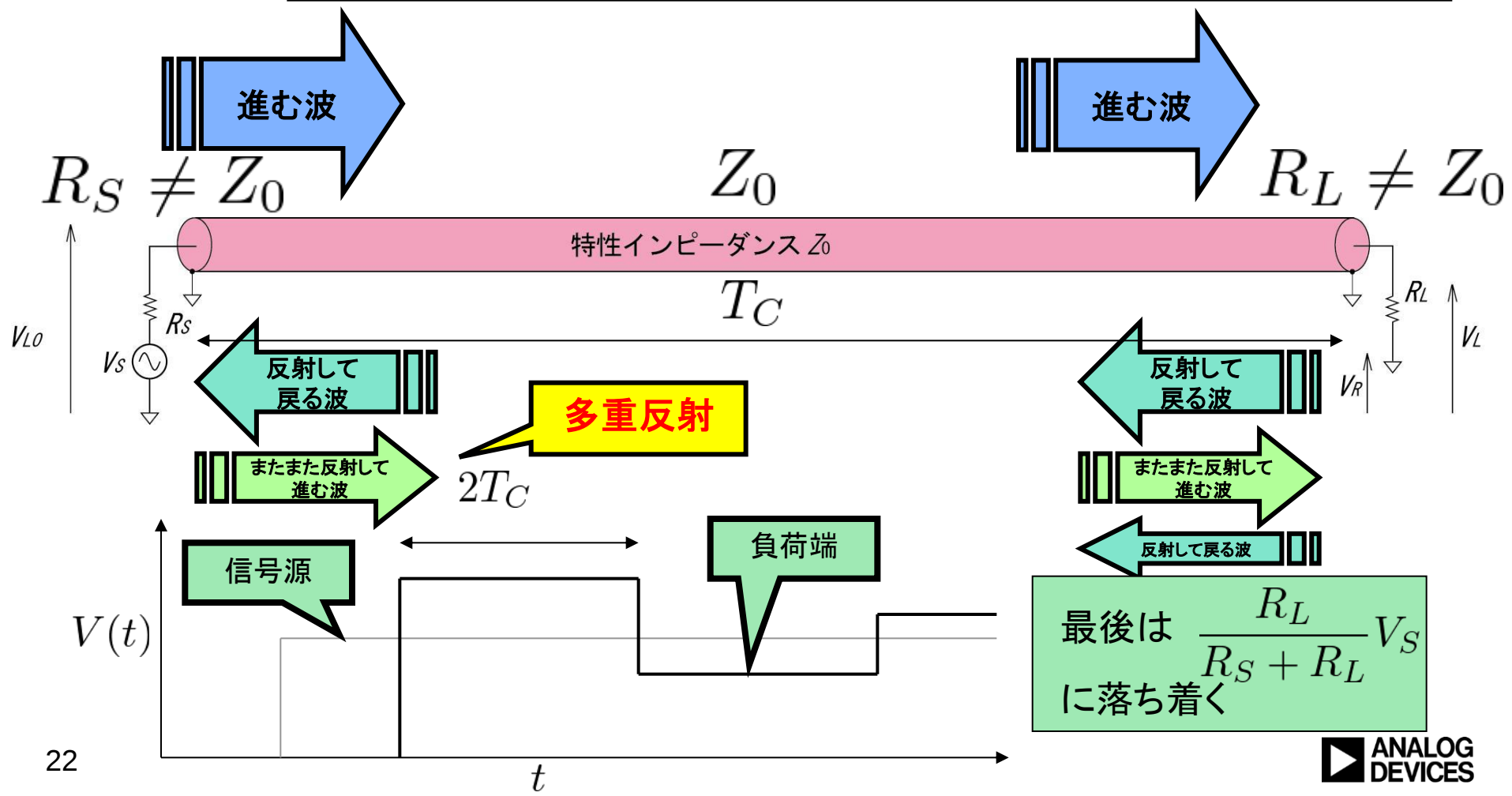
連続した正弦波で反射がある場合、移動しない「定在波」という波の山谷ができる



周波数50MHz、位相速度は光速の66%、
反射係数0.33、進行波の波高10V

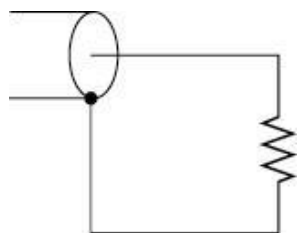
さらに信号源インピーダンスも異なっていると・・・(デジタル信号の例)

負荷が特性インピーダンスに合っていないと、そこで電圧と電流が反射します
信号源のインピーダンスも異なっていると、そこでも反射します(多重反射)

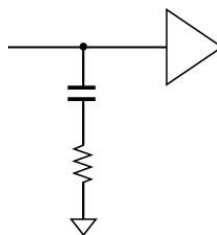


「望まない反射」の止めかた

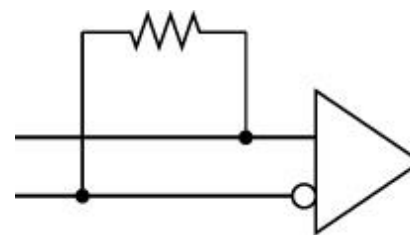
きちんと終端抵抗(ターミネータ)を入れます



高周波回路の例

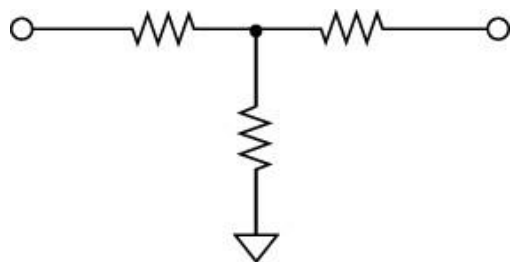


ハイスピード
デジタル回路の例



長距離伝送
(RS-485)の例

途中にロス(アッテネータ)を入れます(信号は小さくなる)



高周波回路の例



それほどパターン長の長くないハイスピードデジタル回路の例



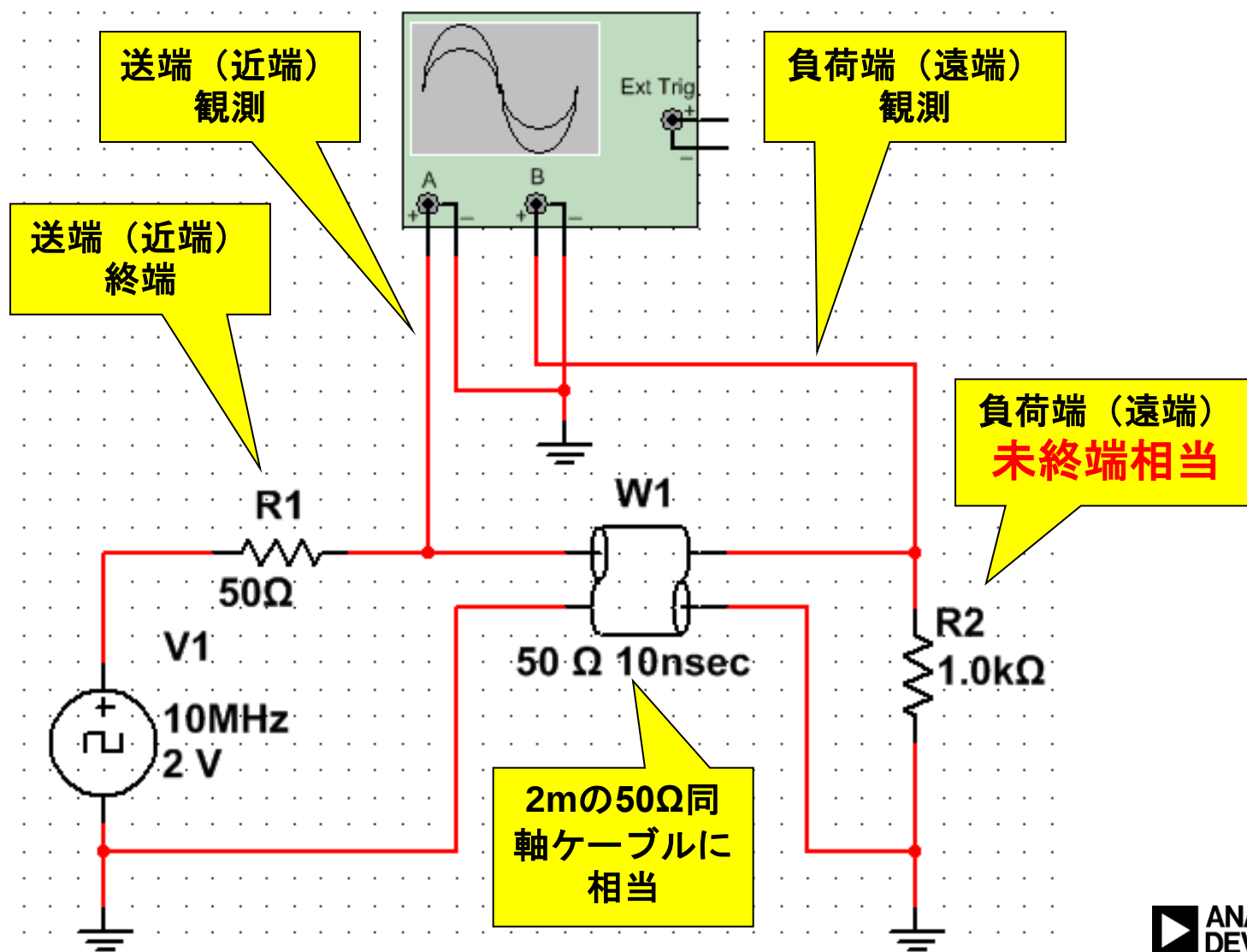
7. 負荷抵抗が合わないと 電圧と電流が反射する・・・「反射係数」

7-2 デジタル信号伝送を例にして

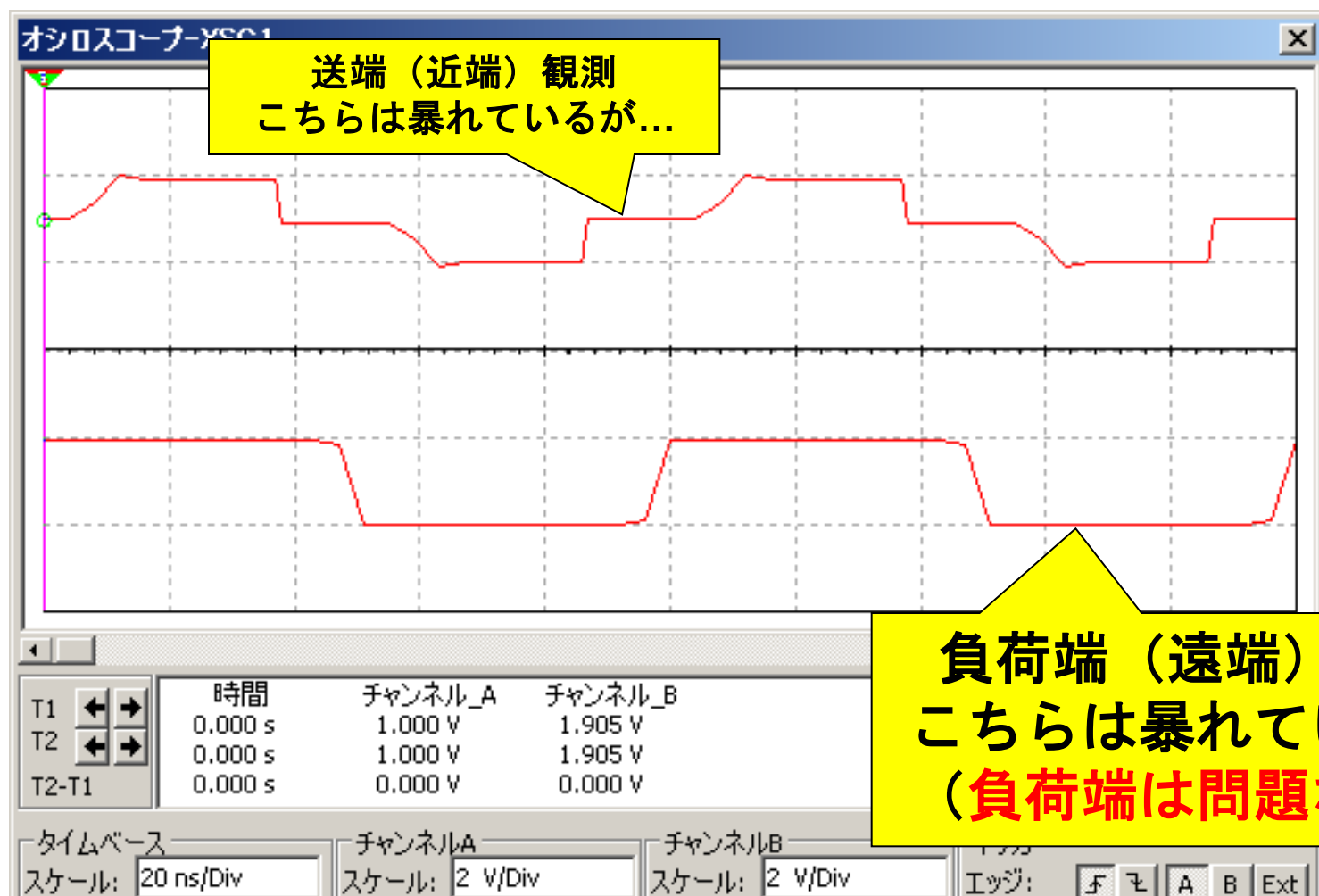
ポイントtoポイントのデジタル伝送の場合

- ◆ USB 2.0やLVDSなどでは両端終端。しかし汎用デジタル信号では...
- ◆ 「送端（信号源）終端」つまり「近端終端のみ」でもポイントtoポイントの場合は問題ありません
 - 近端に戻ってきたときの再反射が無いから
- ◆ 次のスライドでデジタル回路でのシミュレーション結果を示します
- ◆ ポイントtoマルチポイントの場合は問題あり
 - 途中では波形は（いずれにしても）乱れている

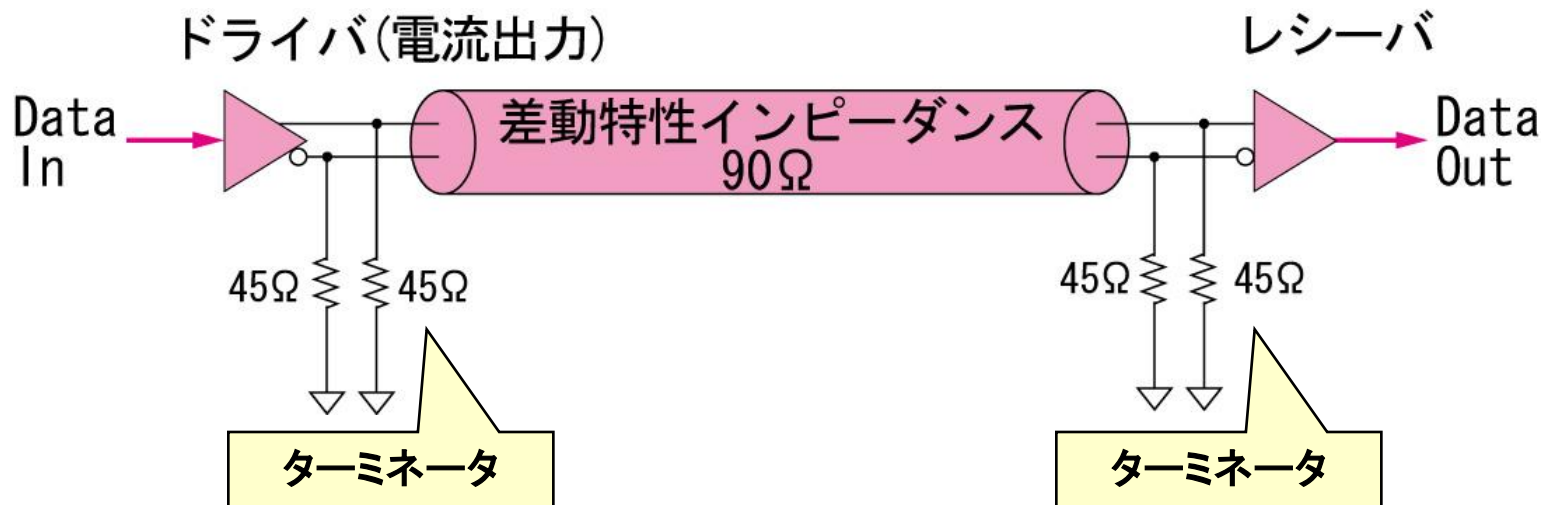
PtoPの例を高速デジタル信号でシミュレーション①



PtoPの例を高速デジタル信号でシミュレーション②



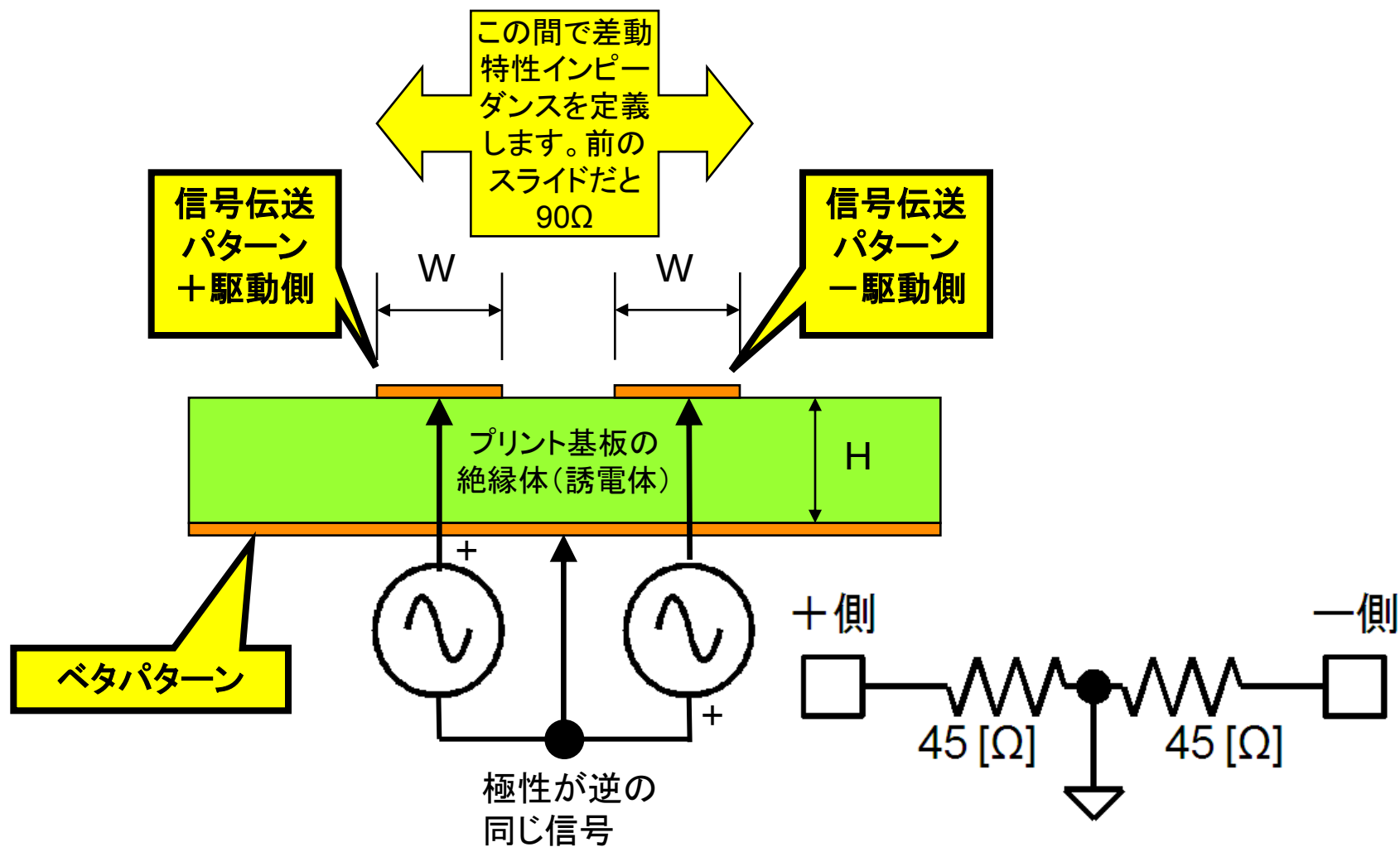
高速デジタル差動伝送の実際 ①



USB 2.0の回路例
(480Mbps)

LVDS, シリアルATA, IEEE1394,
USB 2.0も伝送線路

高速デジタル差動伝送の実際 ②



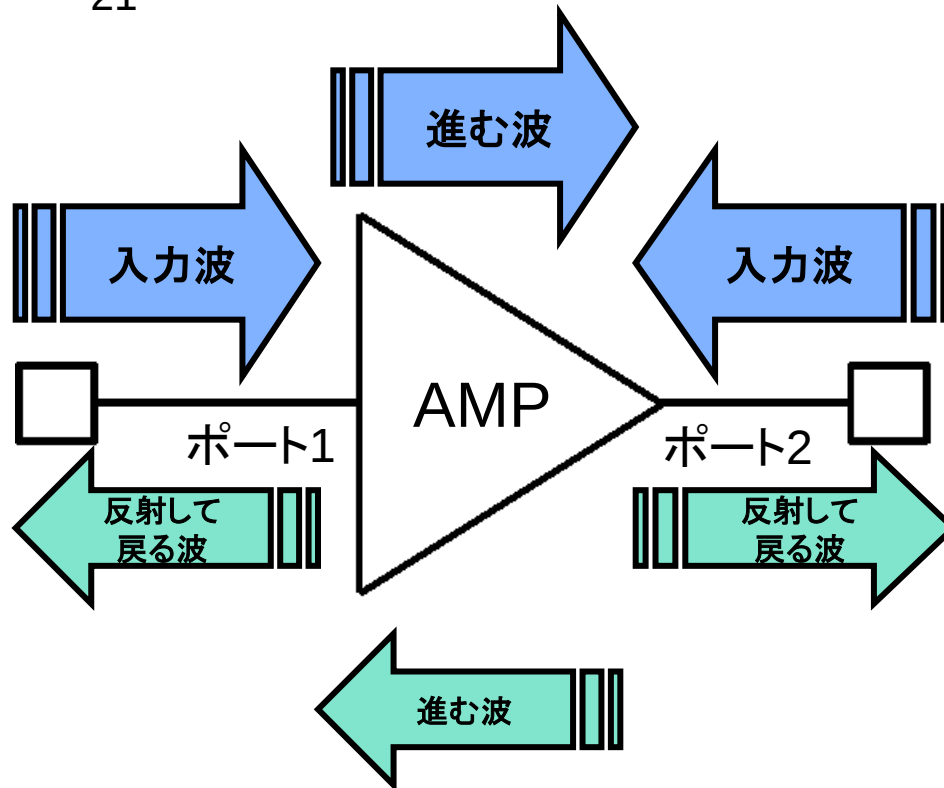


7. 負荷抵抗が合わないと 電圧と電流が反射する・・・「反射係数」

7-3 関連して出てくる用語

関連して出てくる用語 ① S(スキヤッタ;散乱)パラメータ

S_{21} 簡単にいうと**増幅率**。出力／入力の比率

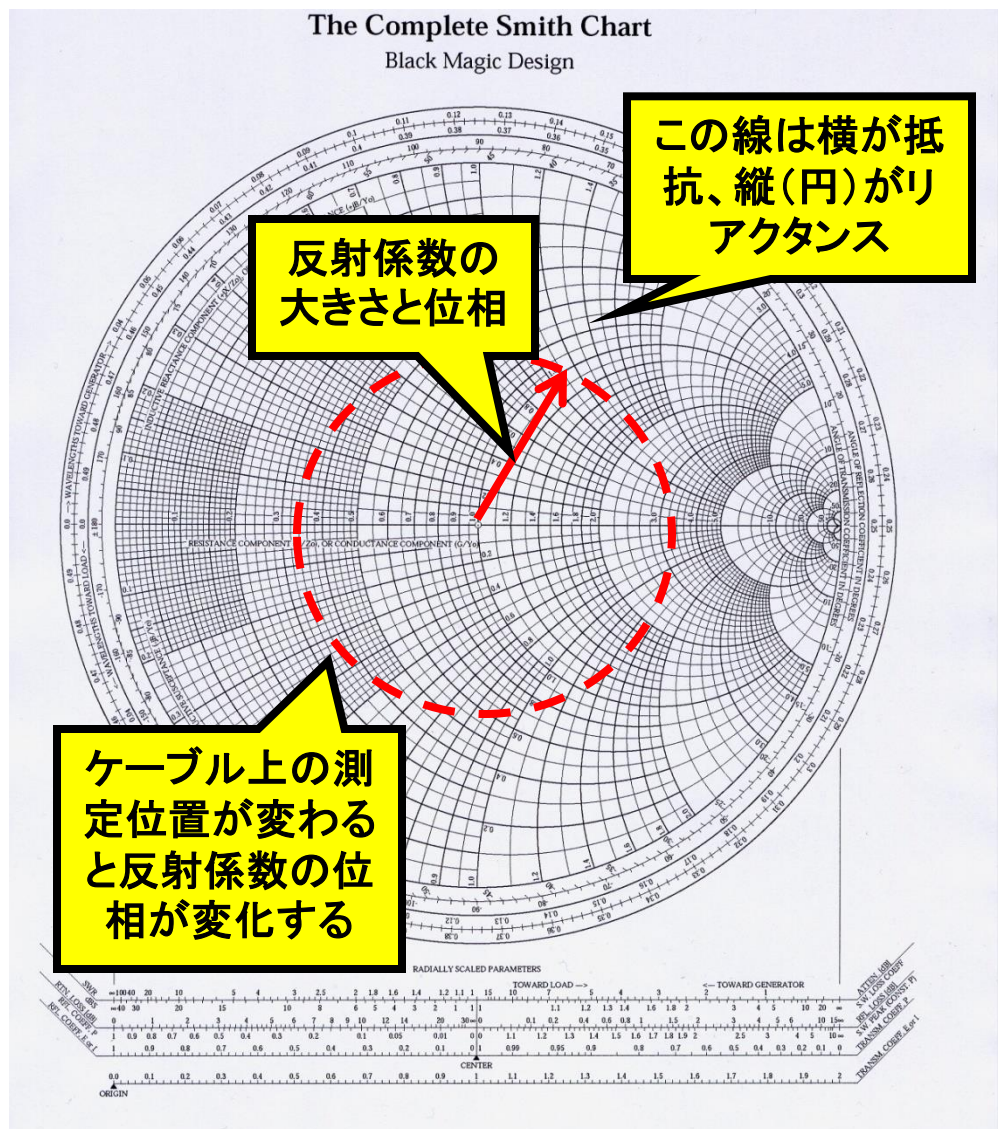


S_{11} 簡単にいうと入力側の**反射係数**。
戻る波／入力波
(電圧同士もしくは電流同士)の比率

S_{22} 簡単にいうと出力側の**反射係数**。
出力に無理やり信号を突っ込んだときの、
戻る波／突っ込んだ量の比率

S_{12} 簡単にいうと**漏れ率**。出力に無理やり信号を突っ込んだときの、入力側に漏れ出した量／突っ込んだ量の比率

関連して出てくる用語 ② スミスチャート



スミスチャートは反射係数と実際のインピーダンスの間をつなぐもの。
その他の計算もグラフ上で可能なのでとても便利

難しい話は抜きにしても**スミスチャートがどんなものか**を理解していただければOK!



関連して出てくる用語 ③

◆ リターンロス

どれだけ反射してくる波が小さいか。
S11と関係する。50Ω(規格化インピーダンス)に近い(反射が小、マッチングしている)と－dB値がマイナス側に大きくなる(値として大きくなる)。
たとえば**反射がゼロだと「－無限大dB」**

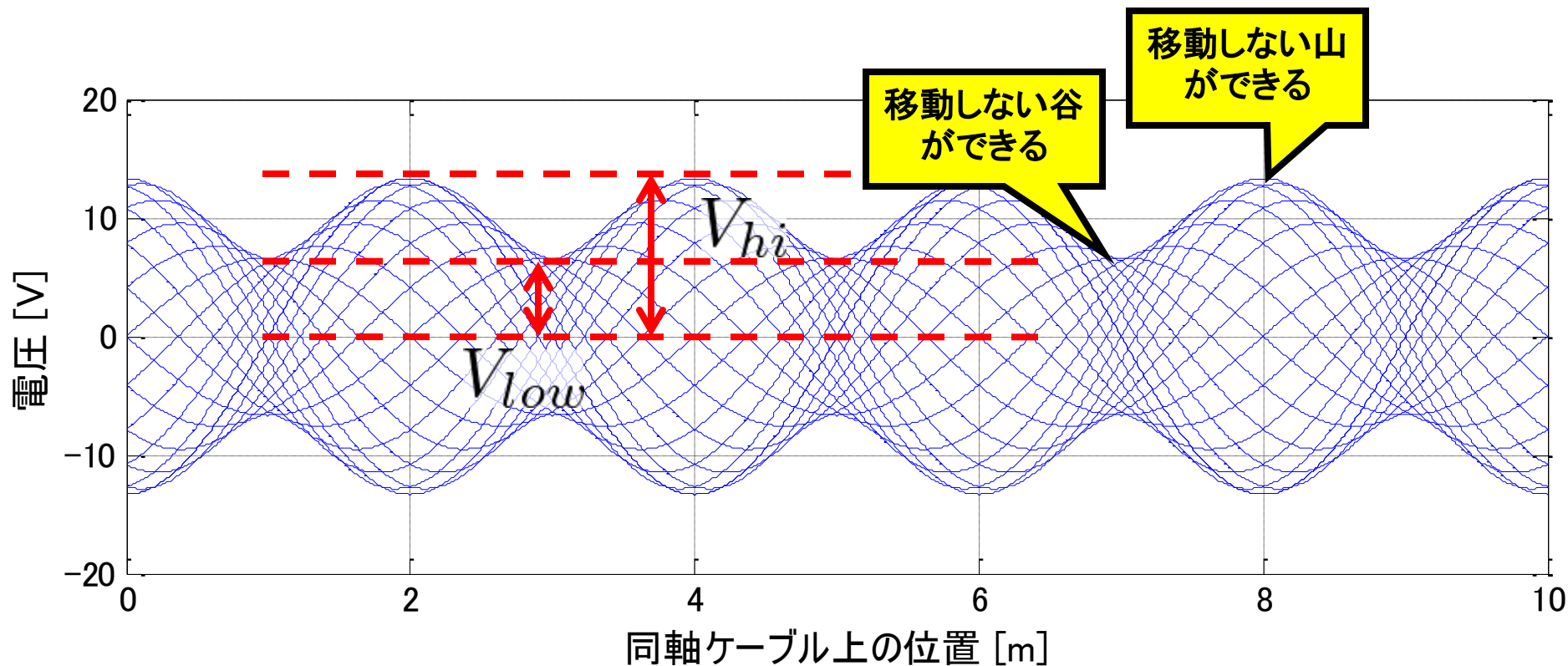
◆ インサーションロス

スイッチなどで、どれだけ信号が出力側に到達するか。ロスの値が大きいとスイッチの性能が悪い

◆ ミスマッチロス

マッチングしていないと信号が反射するため、マッチングしていないことで、どれだけ信号が**出力側に伝わらないか**を示す

関連して出てくる用語 ④ VSWR, SWR



$$VSWR(SWR) = \frac{V_{hi}}{V_{low}}$$

周波数50MHz、位相速度は高速の66%、
反射係数0.33、進行波波高10V

7. まとめ

- ◆「負荷抵抗＝特性インピーダンス(マッチング状態)」でないと、負荷で信号が反射
 - 信号が反射すると、ケーブルの各点で見かけ上のインピーダンスが、場所ごとに変動する
- ◆ デジタル信号では、信号源でも反射がおきて、リングングのように信号が暴れることも多い(多重反射)
- ◆ ここまでは「負荷抵抗が合わない」という視点で説明したが、「負荷抵抗に等しい」特性インピーダンスのケーブル、パターンで信号を伝送することも大切



8. 低雑音設計で重要な NF(ノイズ・フィギア)の理解

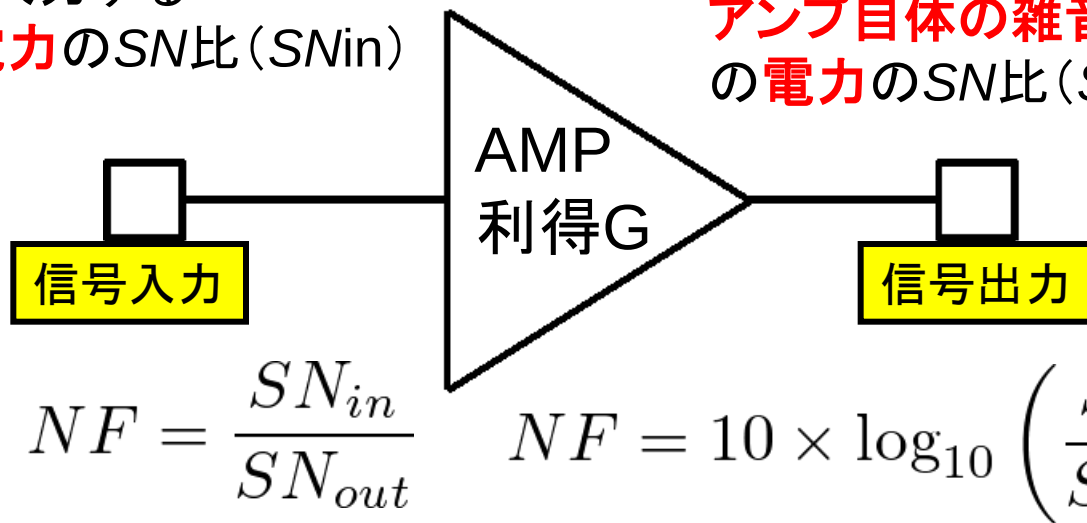
受信機の感度を左右する、アンプの低雑音性能を示す数値です。低い周波数のアンプではあまり出てきませんが、ハイスピード信号を扱うアンプでは、この高周波設計的な**用語でだいたい議論**します。

ぜひ覚えていただくとよいと思います

NFはアンプ自身がどれだけ低ノイズかを示すもの

アンプに入力する
信号の**電力**のSN比 (SN_{in})

アンプから増幅されて出力された、
アンプ自体の雑音も含んだ、信号
の**電力**のSN比 (SN_{out})



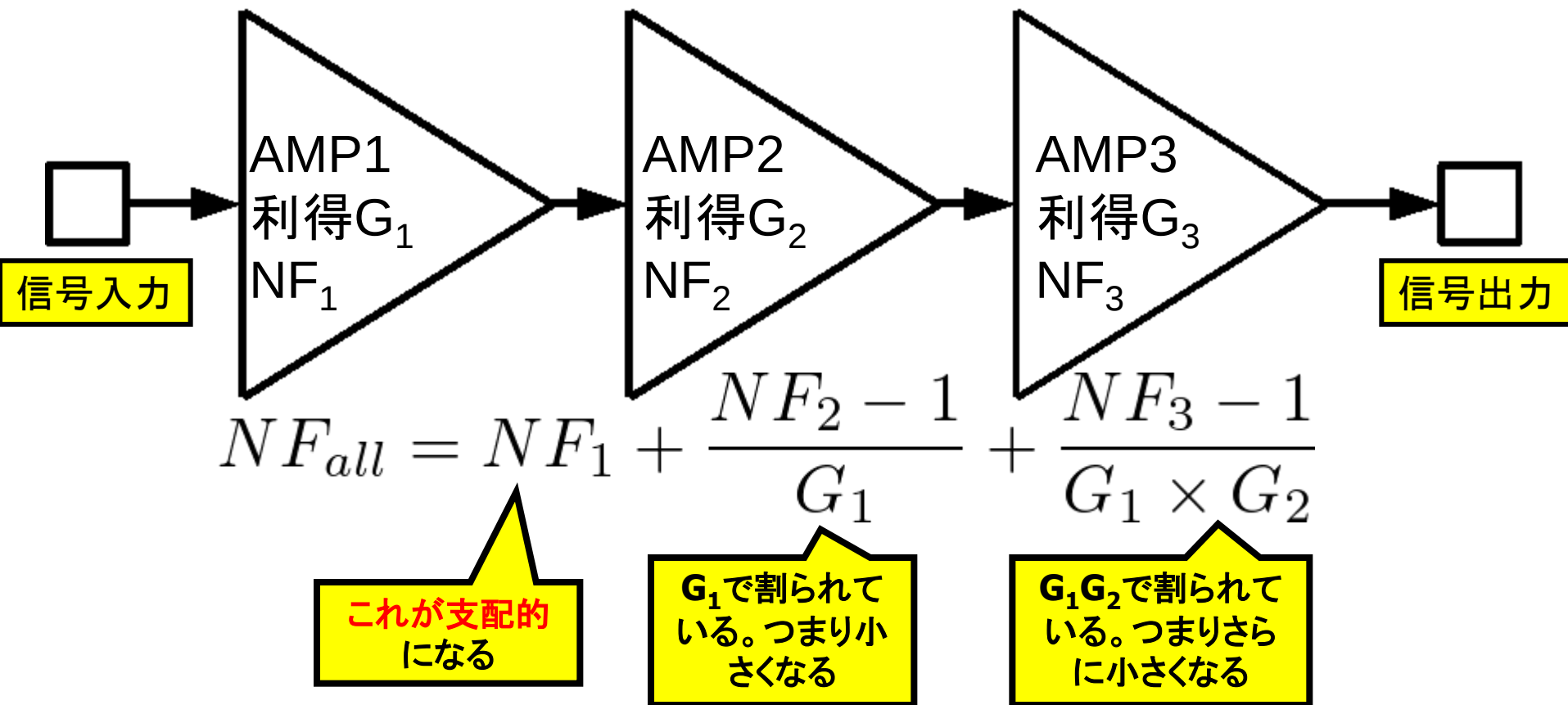
**dBに変換して、
これで話し合う
ことが一般的**

SN_{out} ではアンプ自体の雑音が足しあわされるため、 SN_{in} の方が必ず良い
そのため**NFは1以上**になります

アンプ自体が雑音を出さなければ、 $SN_{in} = SN_{out}$
そのときは**NFは1 (ベスト。dBだと0dB)**になります

そのためアンプが低雑音であれば**NFは小さく**なります

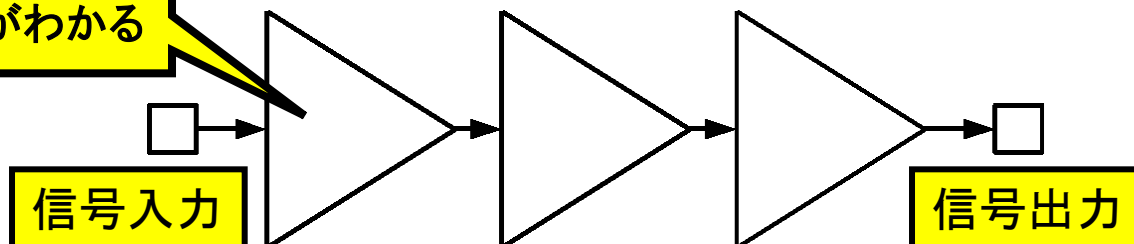
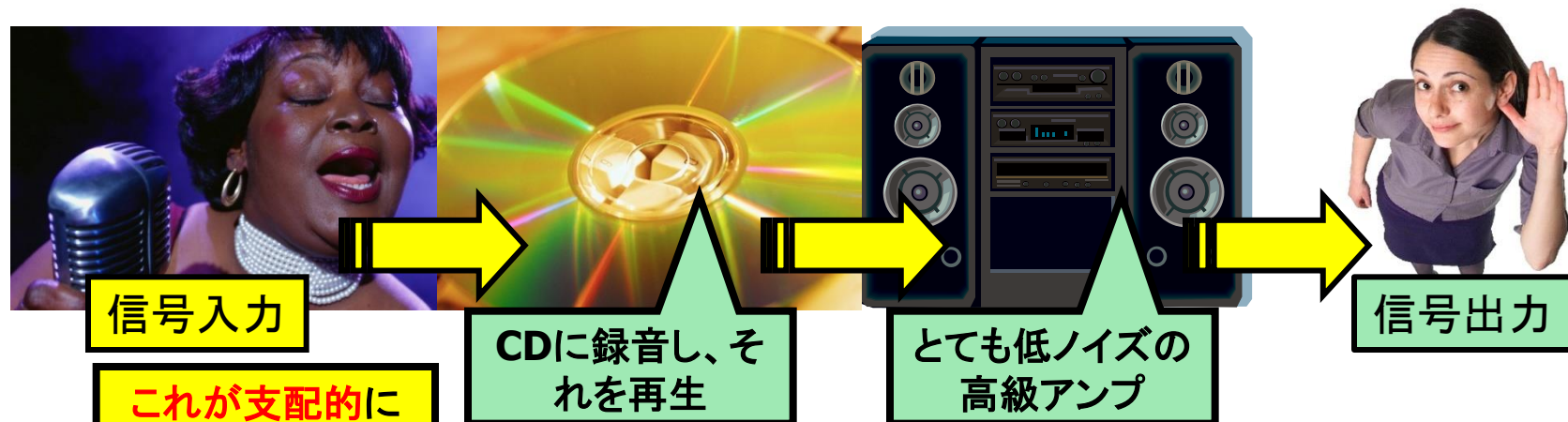
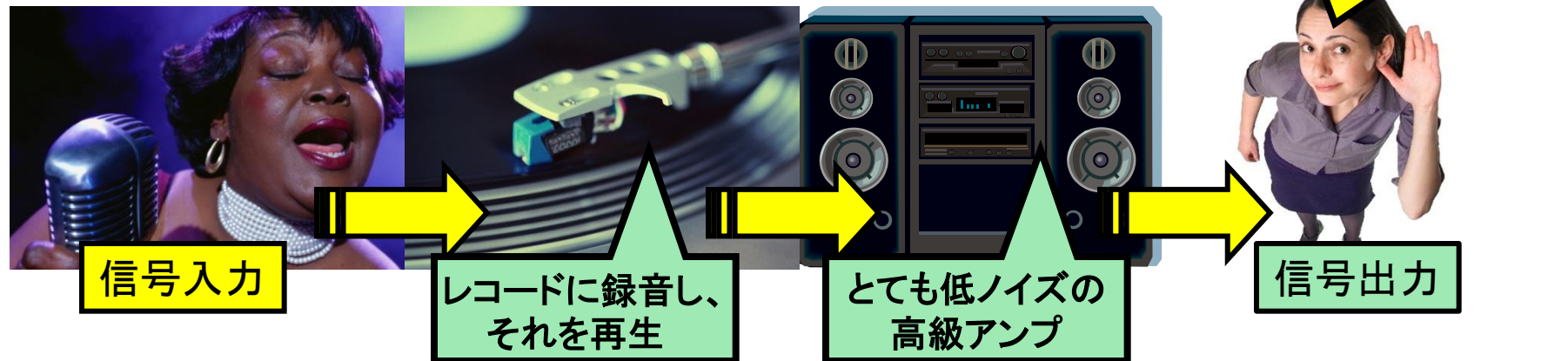
複数接続された場合、初段アンプがNFを決定する



電力で考えます。また上記の式の計算は**dBではありません**

数式ではよくわからない・・・というために、次のスライド参照

イメージで理解してみる





NFに関連して出てくる用語

- ◆ フロントエンド
受信回路の一番あたまのところ。アンテナから入ってきた信号が処理されるあたり。以下のLNAがある。ここまでの説明のように**NFに一番影響を与える部分**
- ◆ LNA
Low Noise Amp. エルエヌエーという。上記のフロントエンドに使われる**低雑音なアンプ**のことを特にこう言う
- ◆ カスケード接続
前のスライドのように直列に接続すること（高周波回路に限らず他でもよく用いられる）



9. 実際のデータシートを引用した 用語の意味合い

ここまで説明した技術用語が、実際のアナログ・デバイセズの製品データシートで、どのように表記されているかを復習をかねてご説明してみます

① 可変ゲインアンプ ADL5330



ゲイン制御範囲60dB、
10MHz～3GHz、VGA

ADL5330

特長

電圧制御アンプ／減衰器

動作周波数：10MHz～3GHz

出力パワー制御を最適化

優れた直線性：OIP3 31dBm@900MHz

出力ノイズ・フロア：-150dBm/Hz@900MHz

50Ωの入力および出力インピーダンス

シングルエンド動作または差動動作

広いゲイン制御範囲：-34～+22dB@900MHz

デシベル・リニアのゲイン制御機能：20mV/dB

単電源動作：4.75～5.25V

アプリケーション

RFとIFでの送信および受信のパワー制御

機能ブロック図

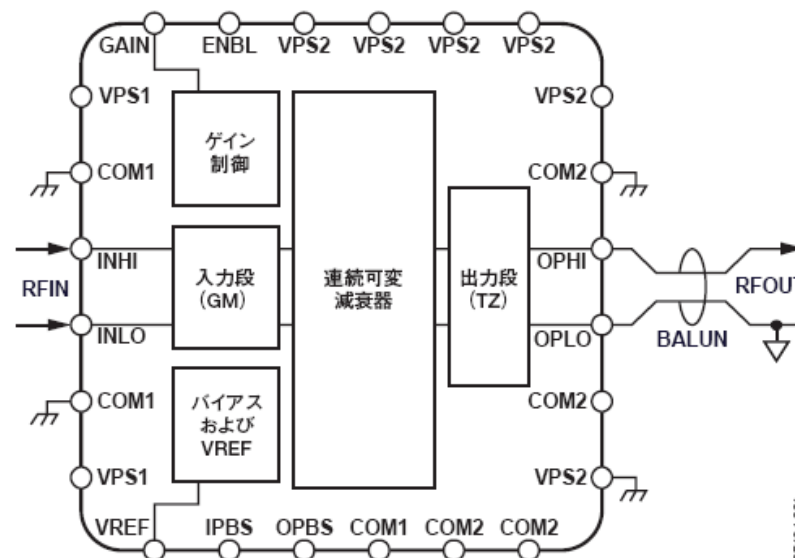


図1

表1

パラメータ	条件	Min	Typ	Max	単位
全体					
使用可能周波数範囲		0.01		3	GHz
公称入力インピーダンス	1:1シングルエンド／差動変換バラン回路を使用		50		Ω
公称出力インピーダンス	1:1差動／シングルエンド変換バラン回路を使用		50		Ω
100MHz					
ゲイン制御スパン	$\pm 3\text{dB}$ ゲイン則に対する整合性		58		dB
最大ゲイン	$V_{\text{GAIN}}=1.4\text{V}$		23		dB
最小ゲイン	$V_{\text{GAIN}}=0.1\text{V}$		-35		dB
ゲイン平坦性の周波数特性	中心周波数 $\pm 30\text{MHz}$ 、 $V_{\text{GAIN}}=1.0\text{V}$ (差動出力)		0.09		dB
ゲイン制御スロープ			20.7		mV/dB
ゲイン制御インターセプト	ゲイン=0dB、ゲイン=スロープ(V_{GAIN} -インターセプト)		0.88		V
入力圧縮ポイント P1dBin	$V_{\text{GAIN}}=1.2\text{V}$		1.8		dBm
入力圧縮ポイント P1dBin	$V_{\text{GAIN}}=1.4\text{V}$		-0.3		dBm
出力3次インターセプト(OIP3) IP3	$V_{\text{GAIN}}=1.4\text{V}$		38		dBm
出力ノイズ・フロア	20MHzキャリア・オフセット、 $V_{\text{GAIN}}=1.4\text{V}$		-140		dBm/Hz
ノイズ指数 NF	$V_{\text{GAIN}}=1.4\text{V}$		7.8		dB
入力リターン損失 ² Return Loss	$1\text{V} < V_{\text{GAIN}} < 1.4\text{V}$		-12.8		dB
出力リターン損失 ²			-15.5		dB

S_{11} のスミスチャート

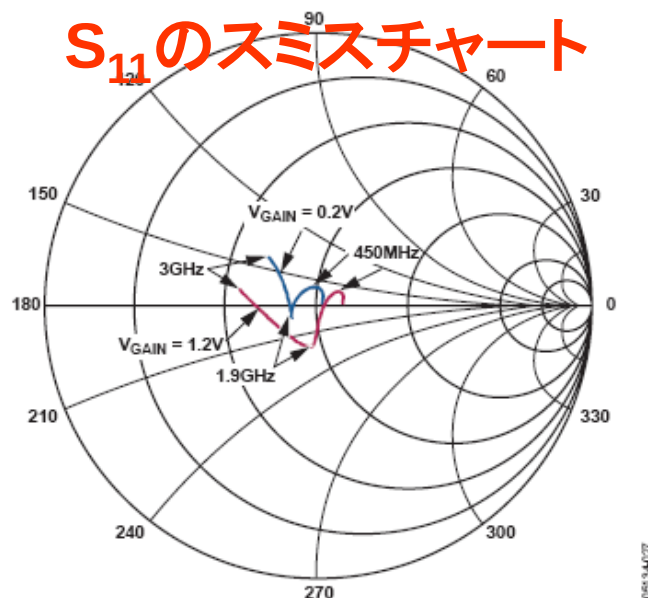


図27. 入力インピーダンス(差動)

S_{22} のスミスチャート

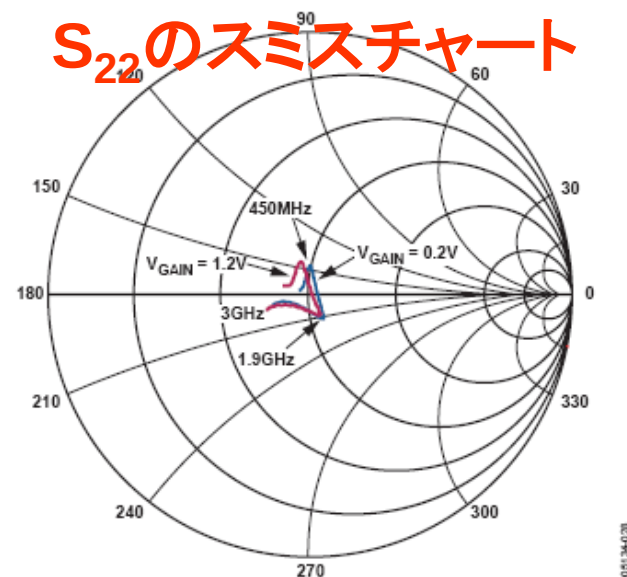


図29. 出力インピーダンス(差動)

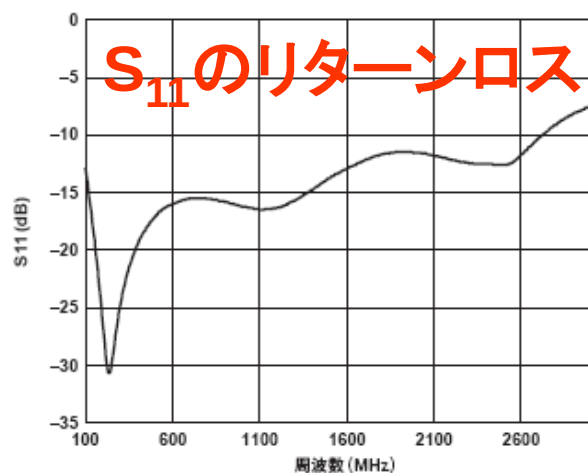


図28. 入力リターン損失 (ETC1-1-13 バラン回路を使用)

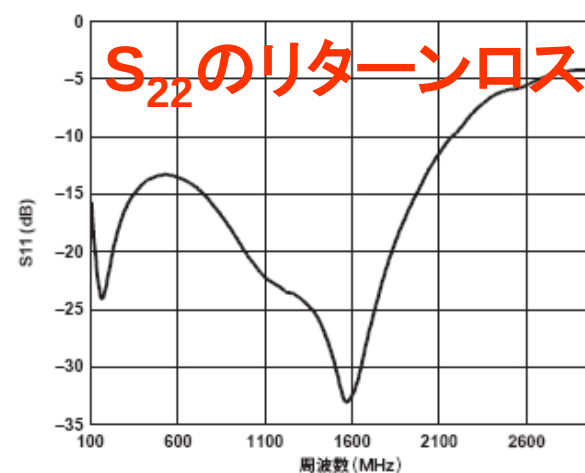


図30. 出力リターン損失 (ETC1-1-13 バラン回路を使用)

② ログディテクタ AD8314



100 MHz to 2.7 GHz, 45 dB
RF Detector/Controller

AD8314

FEATURES

Complete RF detector/controller function

Typical range: -58 dBV to -13 dBV

-45 dBm to 0 dBm, re 50 Ω

Frequency response from 100 MHz to 2.7 GHz

Temperature-stable linear-in-dB response

Accurate to 2.7 GHz

Rapid response: 70 ns to a 10 dB step

Low power: 12 mW at 2.7 V

Power down to 20 μ A

APPLICATIONS

Cellular handsets (TDMA, CDMA, GSM)

For convenience, the signal is internally ac-coupled, using a 5 pF capacitor to a load of 3 k Ω in shunt with 2 pF. This high-pass coupling, with a corner at approximately 16 MHz, determines the lowest operating frequency. Therefore, the source can be dc grounded.

The AD8314 provides two voltage outputs. The first, V_UP, increases from close to ground to about 1.2 V as the input signal level increases from 1.25 mV to 224 mV. This output is intended for use in measurement mode. Consult the Applications section for information on this mode. A capacitor can be connected between the V_UP and FLTR pins when it is desirable to increase the time interval over which averaging of the input waveform occurs.

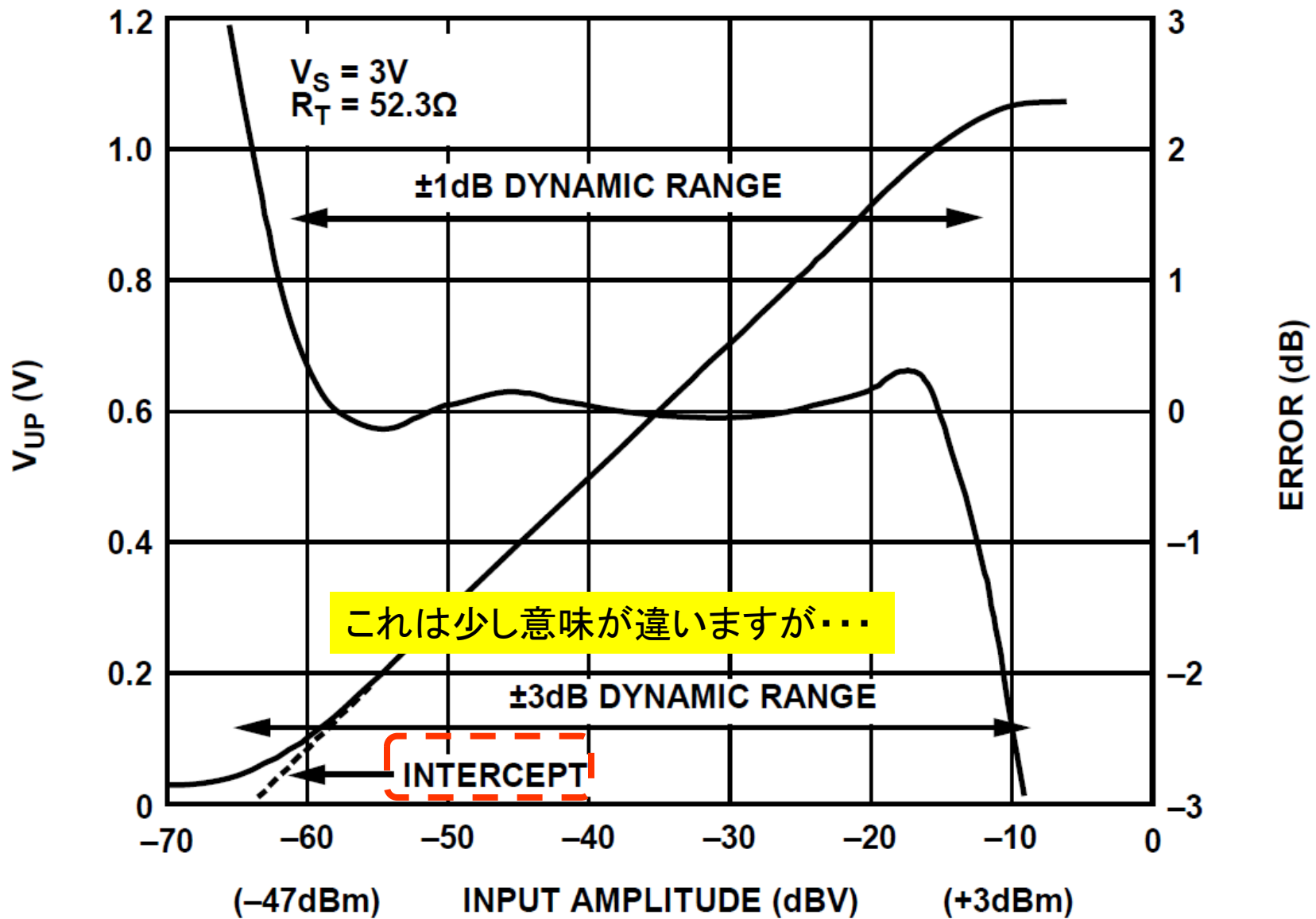


Figure 32. V_{UP} and Log Conformance Error vs. Input Level vs. Input Level at 900 MHz

③ スイッチ ADG918



Wideband 4 GHz, 43 dB Isolation at 1 GHz,
CMOS 1.65 V to 2.75 V, 2:1 Mux/SPDT

ADG918/ADG919

FEATURES

Wideband switch: -3 dB @ 4 GHz

Absorptive/reflective switches

High off isolation (43 dB @ 1 GHz)

Low insertion loss (0.8 dB @ 1 GHz)

Single 1.65 V to 2.75 V power supply

CMOS/LVTTL control logic

8-lead MSOP and tiny 3 mm × 3 mm LFCSP packages

Low power consumption (<1 μ A)

APPLICATIONS

Wireless communications

General-purpose RF switching

Dual-band applications

High speed filter selection

Digital transceiver front end switch

IF switching

Tuner modules

Antenna diversity switching

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAMS

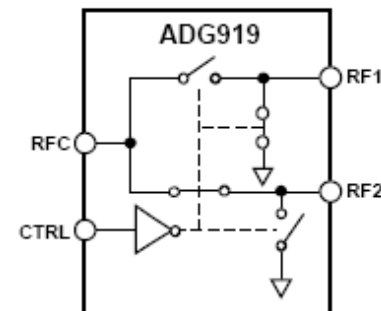
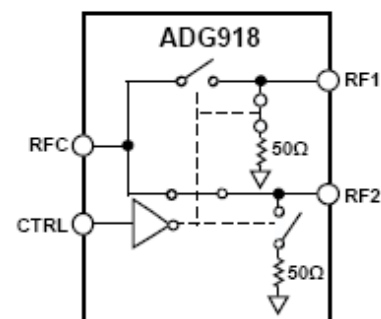


Figure 1.

03835401

Table 1.

Parameter	Symbol	Conditions	Min	B Version Typ ¹	Max	Unit
AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS						
Operating Frequency ²			dc		2	GHz
3 dB Frequency ³					4	GHz
Input Power ³		0 V dc bias			7	dBm
		0.5 V dc bias			16	dBm
Insertion Loss	S ₂₁ , S ₁₂	DC to 100 MHz; V _{DD} = 2.5 V ± 10%		0.4	0.7	dB
		500 MHz; V _{DD} = 2.5 V ± 10%		0.5	0.8	dB
		1000 MHz; V _{DD} = 2.5 V ± 10%		0.8	1.25	dB
Isolation—RFC to RF1/RF2 (CP Package)	S ₂₁ , S ₁₂	100 MHz	57	60		dB
		500 MHz	46	49		dB
Isolation—RF1 to RF2 (Crosstalk) (CP Package)	S ₂₁ , S ₁₂	100 MHz	55	58		dB
		500 MHz	41	44		dB
		1000 MHz	31	37		dB
Return Loss (On Channel) ³	S ₁₁ , S ₂₂	DC to 100 MHz	21	27		dB
		500 MHz	22	27		dB
		1000 MHz	22	26		dB
Return Loss (Off Channel) ³ ADG918	S ₁₁ , S ₂₂	DC to 100 MHz	18	23		dB
		500 MHz	17	21		dB
		1000 MHz	16	20		dB
On Switching Time ³	t _{ON}	50% CTRL to 90% RF		6.6	10	ns
Off Switching Time ³	t _{OFF}	50% CTRL to 10% RF		6.5	9.5	ns
Rise Time ³	t _{RISE}	10% to 90% RF		6.1	9	ns
Fall Time ³	t _{FALL}	90% to 10% RF		6.1	9	ns
1 dB Compression ³	P _{-1 dB}	1000 MHz		17		dBm
Third Order Intermodulation Intercept	IP ₃	900 MHz/901 MHz, 4 dBm	28.5	36		dBm



全体のまとめ

- ◆ 「ちょっと特殊な」高速アナログ回路や高周波回路の「**基礎的な意味合い**」をご説明
- ◆ 高速アナログ回路技術の基本をご説明
 - ◆ 正しく理解して、正しく設計することが肝要
- ◆ 基本となる用語や意味合いが「そのイメージで」わかるだけでも、開発業務がスムーズ

