

位相ノイズ測定

タイムインターバル・エラーと位相ノイズの変換

発振器のショートタームの安定度は、時間軸上ではジッタとして、周波数軸上では位相ノイズとして測定されます。この両者は、全く同じ現象を異なる見方をしたものであるため、相互に変換が可能です。レクロイのオシロスコープには、時間軸での計測ツールであるジッタ・タイミング・アナライザ(JTA)と周波数軸上の計測ツールである高速フーリエ変換(FFT)が装備されているので、単一の機器で両軸での計測が行えます。

位相ノイズは、発振器の回路内で生じる、出力信号のランダムな位相変動であると言えます。このランダムな位相変動は、時間軸上ではクロックの本来あるべきタイミングからのランダムなずれ、つまりジッタとなるのは明白です。周波数軸上では、位相ノイズは変調サイドバンドとなり、信号の周波数スペクトラムの裾の広がりとして見えます。

典型的な位相ノイズ測定の構成を図1に示しました。被測定発振器の出力は、同一周波数で位相を90度ずらした低位相ノイズの基準発振器の出力とミックスされています。2信号が完全に直交することを保証するために、ミキサ出力の直流成分が最小になるように位相のシフト量を調整します。この場合、ミキサは位相検出器として働き、出力は2信号の位相差に比例した電圧を発生させます。基準発振器は非常に低位相ノイズなの

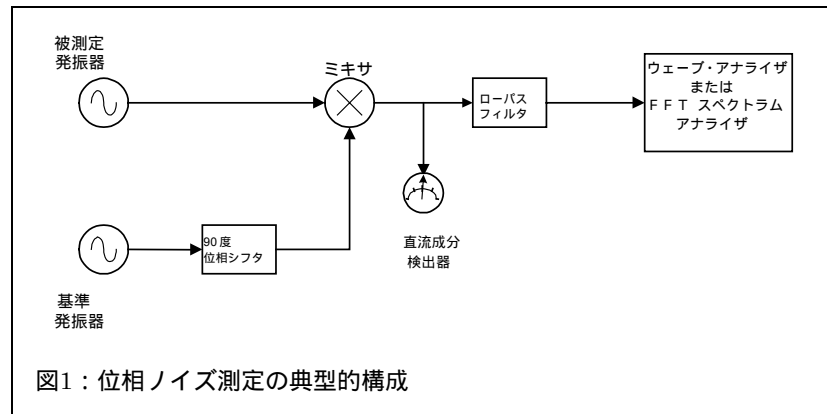


図1：位相ノイズ測定の典型的構成

で、ミキサの出力は、理論的に被測定発振器の位相ノイズの関数となります。また、ここでは両発振器には顕著な振幅変動成分がないと仮定しています。

ミキサの出力は、ローパス・フィルタを通して高周波成分を取り除きます。出力スペクトラムは、ウェーブ・アナライザまたはFFTスペクトラム・アナライザで観測されます。位相ノイズは、通常パワースペクトラム密度関数として表され、単位周波数当たりのキャリアのパワーとの比をデジベルにしたdBc/Hzの単位で表示されます。

レクロイのJTAオプションにあるタイム・インターバル・エラー(TIE)関数は、入力信号が設定した電圧レベルで交差するタイミングと設定した理想のタイミングとの差を時間またはユニット・インターバルを使って計測できます。このTIE関数を使うと、この時間差またはユニット・インターバルの時間変動を見ることができ、TIEが時間差を使って表示されていると、位

相変調信号のエンベロープが表示されます。適当なスケールングをしてFFT解析をすれば、計測したTIEを元に位相ノイズを表示できます。

オフセット周波数 f_m における片側サイドバンドの位相ノイズのキャリアに対する比 (f_m) は、

$$(f_m) = 20 \log_{10} (\quad / 2)$$

ここで、 \quad はラジアンで表した位相変動のピークと表されません。

タイム・インターバル・エラーのFFTスペクトラムにおける位相変動のピーク $t(f_m)$ は、

$$\quad = 2 \quad f_c \quad t(f_m)$$

と表されます。先ほどの式に代入すると、位相ノイズは、

$$(f_m) = 20 \log_{10} (2 \quad f_c \quad t(f_m) / 2)$$

となり、オシロスコープの演算を用いて計算するために以下のように変形することができます。

$$(f_m) = 20 \log_{10} (\quad f_c) + 20 \log_{10} (\quad t(f_m))$$

既知の位相変動量を位相変調された信号を使った測定をすることで上記の計算の評価をしてみます。レクロイの任意波形発生器LW420を用いて10 MHzのキャリア信号を10kHzの変調信号で位相変動のピークが10度(0.174 radians)の信号を作り出します。FFTを行った信号のスペクトラムを図2に示します。

片側のサイドバンドの振幅は、先ほどの関係式から片側サイドバンドのキャリアとの比は、
 $(dB) = 20 \log_{10} (d/2)$
 ここで、 d は、位相変動をラジアンで示したものです。

位相変動 10 度 (0.174 ラジアン) において、サイドバンドのレベルは、片側サイドバンドのキャリアとの比は、
 $(dB_c) = 20 \log_{10} (d/2)$
 $= 20 \log_{10} (0.174/2) = -21.21 \text{ dB}_c$
 となることが期待されます。

図2 で示される実測値のサイドバンドのレベル($V_m = 84.54 \text{ mV}$)とキャリアの振幅 ($V_c = 962.77 \text{ mV}$)からサイドバンドの比は、片側サイドバンドのキャリアとの比は、
 $(dB_c) = 20 \log_{10} (V_m / V_c) = 20 \log_{10} (84.54 / 962.77) = -21.13 \text{ dB}_c$ となります。

この実測の結果は、期待された値によく合致しており、位相ノイズ測定に使用可能であることを示しています。同じ信号をオシロスコープに入力したまま、位相ノイズの測定方法をJTAのタイム・インターバル・エラーをFFTして求めるように計算方式を変更してみます。FFTした後のスペクトラムのスケールを以下の式を使って変換

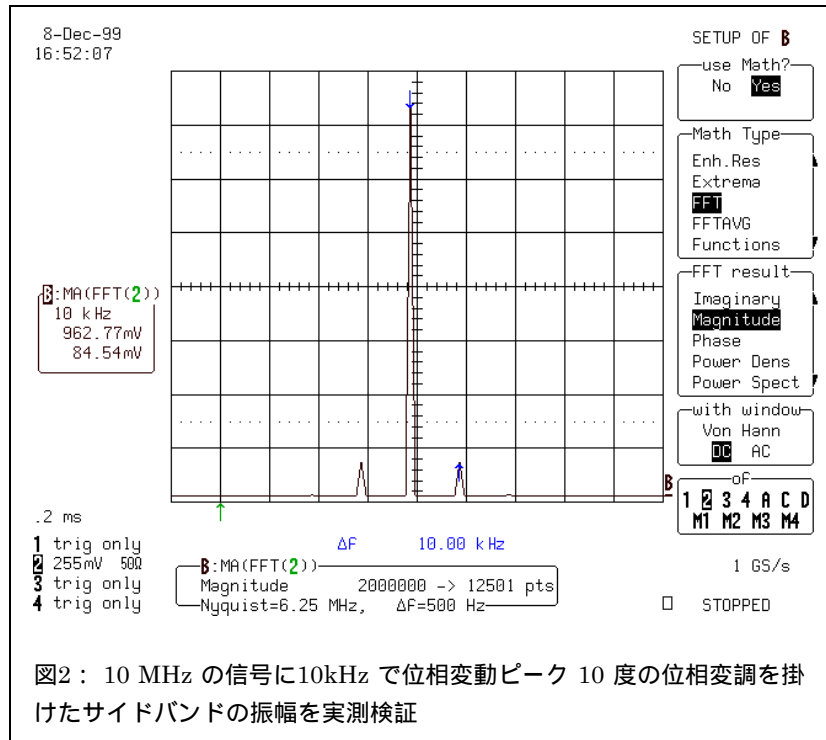


図2： 10 MHz の信号に10kHz で位相変動ピーク 10 度の位相変調を掛けたサイドバンドの振幅を実測検証

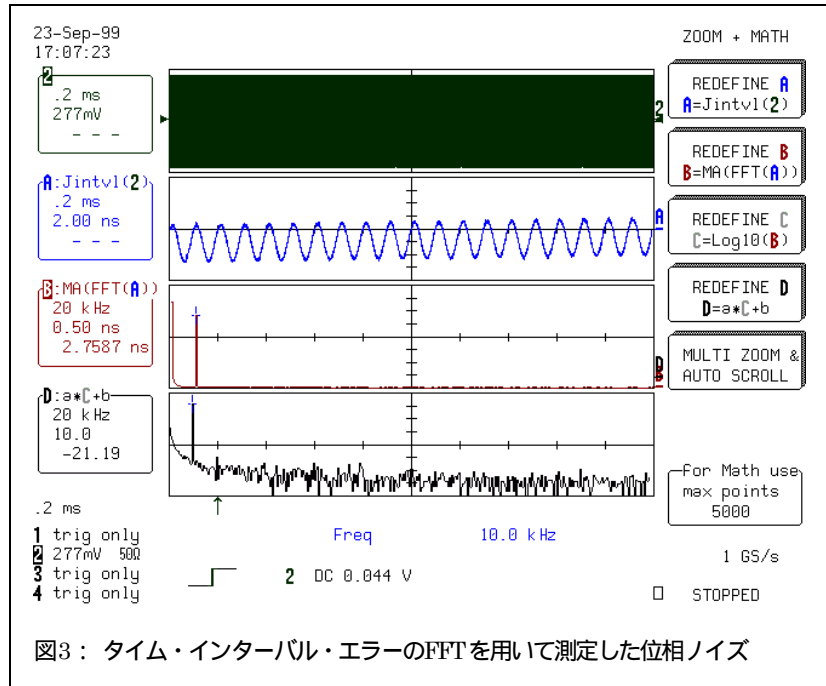


図3： タイム・インターバル・エラーのFFTを用いて測定した位相ノイズ

します。
 $(f_m) = 20 \log_{10} (f_c) + 20 \log_{10} (t(f_m))$
 キャリア周波数が 10 MHz では、
 $(f_m) = 20 \log_{10} (10^7) + 20 \log_{10} (t(f_m)) = 150 + 20 \log_{10} (t(f_m))$

この式は、片側サイドバンドの位相ノイズ (f_m) とタイム・インターバル・エラーのFFT $t(f_m)$ との関係を示しています。位相ノイズは、TIE 関数のFFTとして計算されFFTの結果に対数をかけた後、スケールが行われます。掛けた定数20は、

dB に変換しています。また足した定数150 は、dBc (キャリアに対するdB)に変換しています。

図3では、この方法を使った位相ノイズの測定が示されています。測定結果は、-21.19 dBcとして一番下のトレース(トレースD)に示されています。ズームと演算の設定メニューに各4つの演算トレースの設定の概要が示されています。トレースAでは、チャンネル2のTIE関数が演算されており、トレースBでは、このTIE関数(トレースA)のFFTが行われています。さらにトレースCを使ってこのFFTの結果(トレースB)を対数変換し(ここでは、表示されていませんが)、最後にトレースDでスケールリングを行っています。

図3のトレースDに示された位相ノイズの関数は、約70 ~ 75 dBcのダイナミックレンジがあります。このダイナミックレンジは、FFTアベレージを使って広げることができますが、それにはさらに演算トレースを1つ必要とします。FFTアベレージの結果を内部メモリに一旦保存して、この保存した結果に対して対数変換とスケールリングをすることで演算とレースの不足分を補うことができます。

図4では、FFTアベレージを使ってダイナミック・レンジを広げた測定の例を示しています。この例では、変調周波数が100 kHzで位相変動は 0.31×10^{-3} ラジアンで、サイドバンドのレベルは-76dBcとなるはずですが、実測値が-75.1 dBcになっていることに注目してください。この測定方法の最低ラインは-80dBcであり、これは位相変動のピークが3 psに相当します。つま

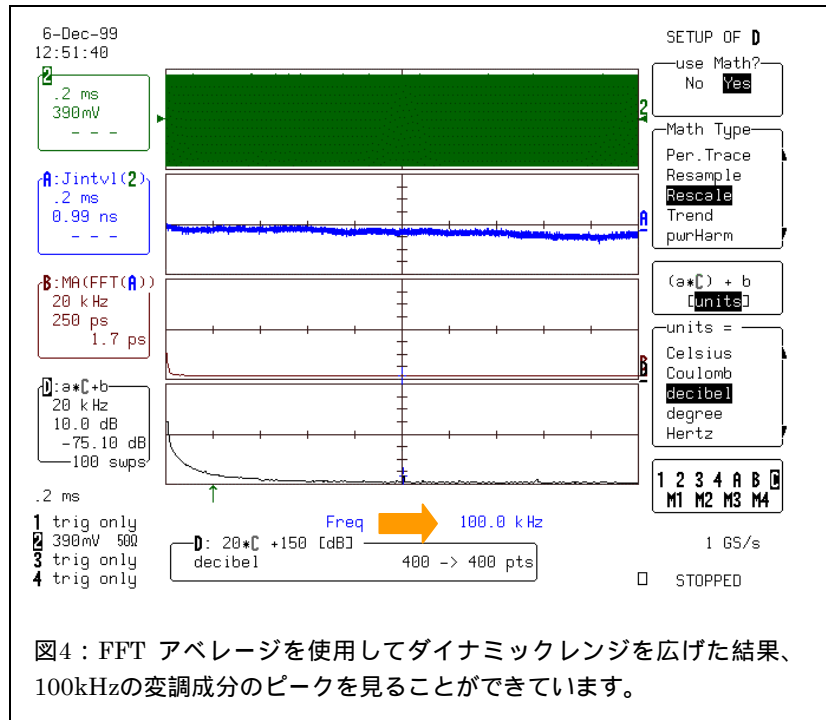


図4：FFTアベレージを使用してダイナミックレンジを広げた結果、100kHzの変調成分のピークを見ることができています。

り、6psのピーク・ピーク・ジッタ、ガウス分布だと仮定すると、約1psのrmsジッタになります。

また、リスケールによってトレースDの単位がdBに変換されていることにも注目してください。表1には、10MHzのキャリアに既知の100kHzで既知の位相変調をかけた信号の実測値を複数示すことで、この測定法の

直線性を実証しています。実測値は、80 dBのダイナミックレンジに渡り、1 dB以内になっていることが期待されます。この測定に用いられた信号源はアジレント社のHP 8648Cで、レクロイのLW420の信号を使って位相変調を行っています。

位相ノイズ解析における縦軸の単位は、FFT解析のノイズバンド幅で割ることで、パワー密

位相変動量 (ラジアン)	サイドバンドのレベルの理論値 (dBc)	サイドバンドのレベルの実測値 (dBc)
0.1	-26.02	-25.69
0.08	-27.95	-27.64
0.05	-32.04	-31.68
0.03	-36.48	-37.57
0.01	-46.02	-46.89
0.005	-52.04	-52.95
0.0025	-58.06	-58.96
0.00125	-64.08	-64.66
0.000625	-70.1	-70.25
0.0003175	-76.12	-75.1

度関数dBc/Hz に変換することができます。dBc/Hz で表された位相ノイズは、時間軸のジッタを使って以下のように表すことができます。

$$(f_m) = 20 \log_{10} (f_c) + 20 \log_{10} (t_{(f_m)}) - 10 \log_{10} (f \text{ ENBW})$$

ここで、 f は、FFT の周波数分解能(FFT の設定メニューに示されます)ENBW は、選択したウィンドウ関数の等価ノイズ・バンド幅で、取扱説明書に記載されています。

図5 は、パワー密度関数(dBc/Hz)を単位とした位相ノイズ測定を示しています。信号は、10 MHz のキャリアに位相変動のピークが0.1ラジアンになるように100 kHz の信号で位相変調かけたものを使用しています。FFT の周波数分解能が1 kHz でウィンドウ関数としてレクタングラーを用いたのでENBW は1.00 になります。

まとめとして、信号の位相ノイズを時間軸のジッタを元に計算することができます。この計算をすることで、ジッタ測定を時間軸と周波数軸の両方で同時に行うことができます。この測定におけるダイナミックレンジは、アベレージなしで約-

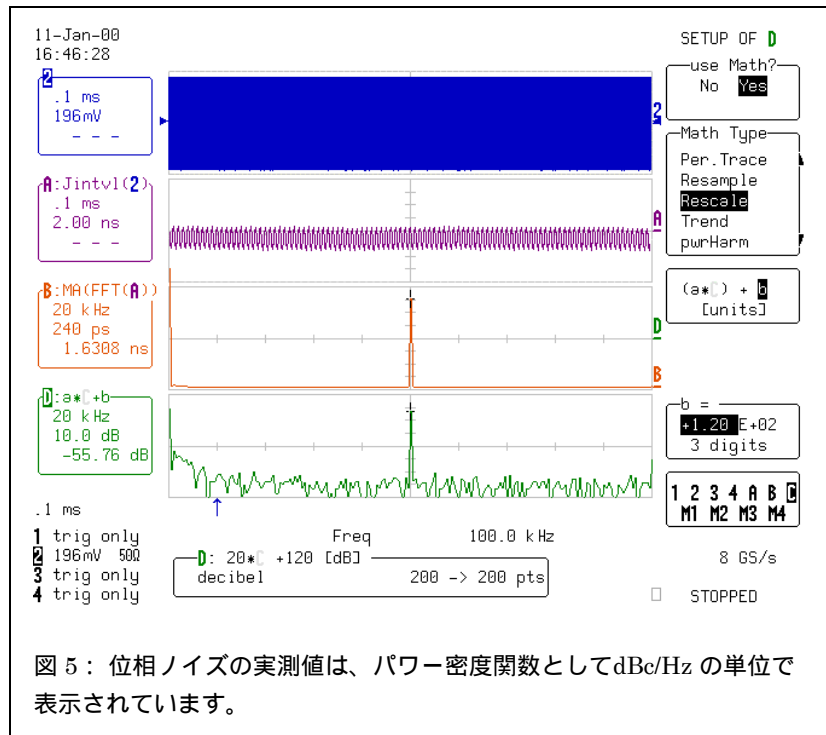


図5：位相ノイズの実測値は、パワー密度関数としてdBc/Hz の単位で表示されています。

70dBc、周波数軸上でのアベレージを行うと、ダイナミックレンジは約-80 dBc まで広げることができます。位相ノイズの測定は、基本的なジッタ測定を用いながら、演算のリンクをすることで得られます。この測定は、レクロイのデジタル・オシロスコープの定評のある機能によるものです。

参考文献：
“Frequency Synthesizers, Theory and Design” by Vadim Manassewitsch, John Wiley and Sons copyright 1976