

～ クロックのジッタと位相雑音 ～

1. 背景

近年、情報通信機器をはじめとする各種電子機器に用いられる水晶発振器は、情報量の増大に伴い基準クロック信号は高速化とともに低雑音化が求められています。例えばデジタル無線通信での変調方式の多値化、車載ミリ波レーダなどにおける高分解能の必要性、またデジタルオーディオでは DA 変換でのより高度な原音再現性の追求など、多くのアプリケーションにおいて位相雑音やジッタ性能など雑音性能の優れた高品質なクロック信号源が求められています。

水晶振動子とこれを利用した水晶発振器は、その優れた周波数の安定性によって高品質なクロック信号源として多くの電子機器に使用されています。周波数安定度、温度特性、エージング特性といった長期的もしくは静的な安定性だけでなく、水晶振動子の持つ高い Q 値によって、位相雑音やジッタ性能に代表される短期的な安定性においても非常に優れています。

本稿では水晶発振器のジッタと位相雑音についての概要を解説し、最後に低位相雑音に特化して開発した当社製品を紹介させていただきます。

2. ジッタと位相雑音

(1) ジッタ

ジッタとはクロック信号波形の時間軸方向の揺らぎによって生じるクロックエッジの理想的な位置からのズレを表しています。水晶発振器の出力電圧波形は図に示すように、トリガーポイントから 1 周期離れたエッジ部分は本来あるべき位置に比べある程度の変動幅が生じます。この変動はクロック 1 周期の時間変動に相当するためピリオドジッタと呼びます。

一般的にはヒストグラムの RMS 値もしくは peak to peak で表します。また単位は rad、秒、unit interval(UI)の 3通りがありますが、一般的には多くの場合、秒が使用されます。

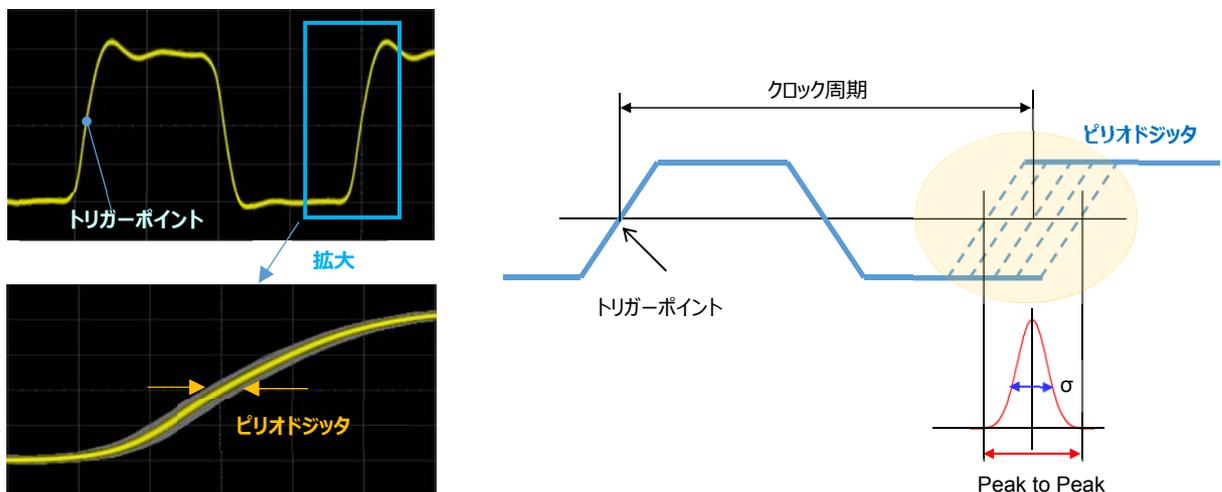


図 1: 水晶発振器の出力波形とピリオドジッタ

ジッタはその発生原因から、ランダムジッタ (RJ) とデターミニスティックジッタ (DJ) に大別できます。

RJ は、半導体デバイスの熱雑音、ショット雑音などにより自然誘発的に起きるジッタです。小さなノイズ発生プロセスが多数累積することによって生じるため、その分布形状は正規分布に近似できます。

一方、DJ は様々な規則性のある要因 (回路設計、電磁誘導、また外部環境から誘発される) により発生し、その発生原因により周期ジッタ (PJ) とデータ依存ジッタ (DDJ) に分類されます。分布の変化幅は境界のある特性を持っており、左右の RJ に挟まれた部分で表すことができます。ランダムではない特定の発生原因があり、エッジのズレはランダムなバラツキではなく確定的 (予測可能) なジッタ成分です。RJ と DJ を合わせてトータルジッタ (TJ) と呼ばれます。

PLL 回路を用いずに出力周波数をダイレクトに発振している水晶発振器では DJ の成分はほとんど無く、実質的に RJ の成分のみとなります。

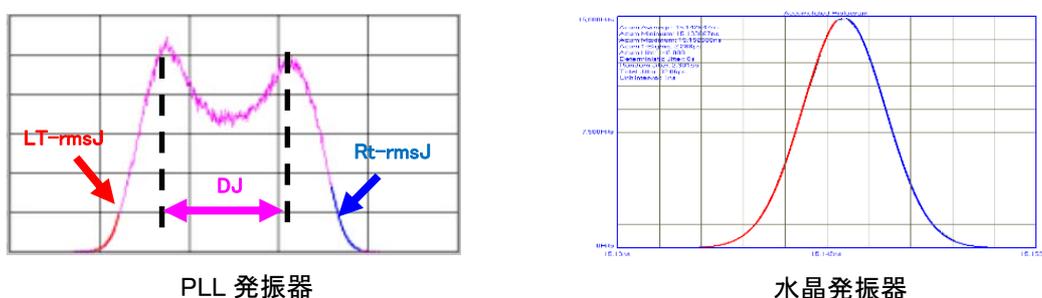


図 2: ランダムジッタとデターミニスティックジッタ

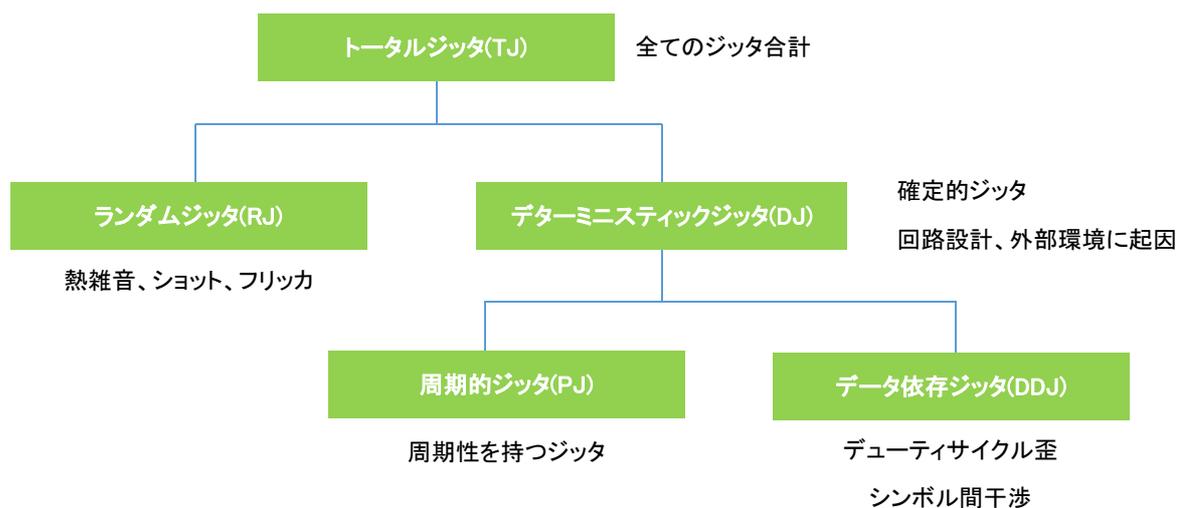


図 3: 各種ジッタ

ジッタタイミングの定義方法によってジッタは位相ジッタ、ピリオドジッタ、サイクル間ジッタに分類されます。位相ジッタはクロックエッジの理想クロックと被測定信号との差の累積であり、ロングタームジッタもしくは累積ジッタと呼ばれる場合もあります。ピリオドジッタはクロック周期の変動、サイクル間ジッタは隣り合うクロックの周期間の差の変動を表します。

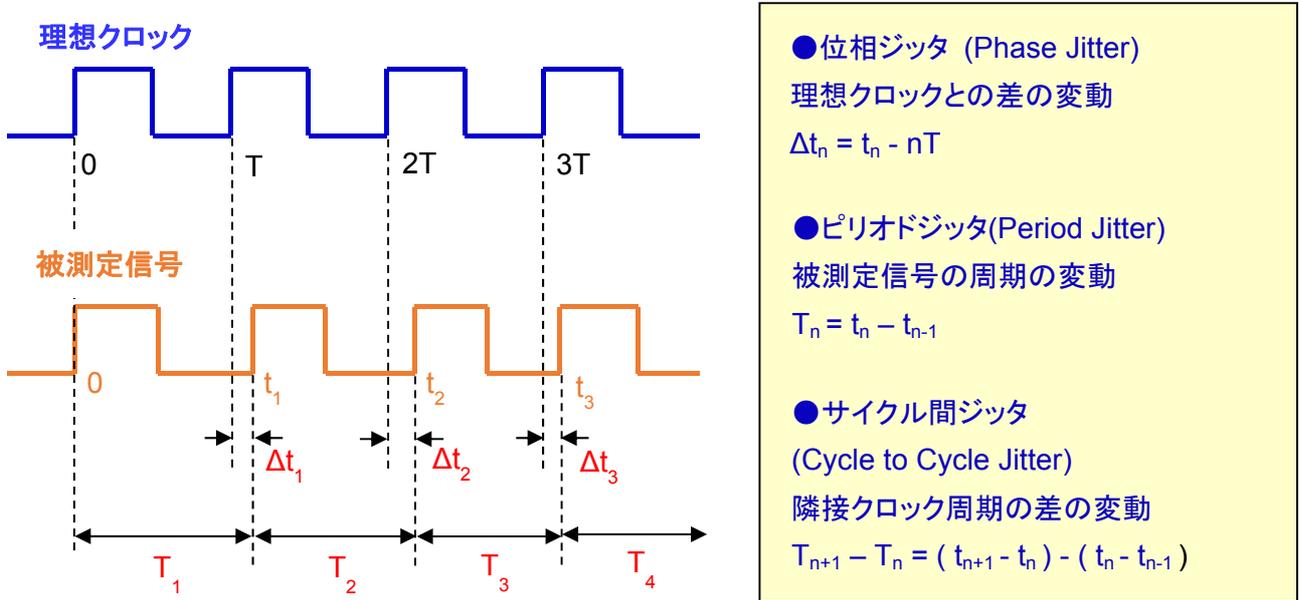


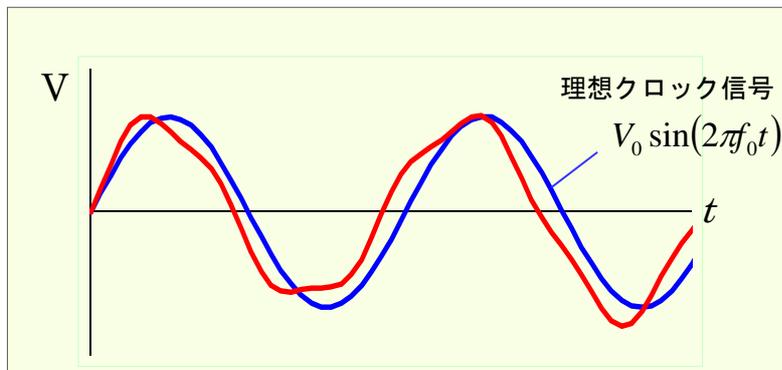
図 4: 位相ジッタ、ピリオドジッタ、サイクル間ジッタ

(2) 位相雑音と位相ジッタ

位相雑音は位相揺らぎのパワースペクトル密度を意味し、信号の純度を表す尺度です。中心周波数から一定値離れた位置(オフセット周波数)における周波数成分で表現し、値が小さいほどノイズ成分の少ない優れた信号といえます。一般的には単側波帯近傍雑音をキャリア電力で正規化して表現します。

図 5 は位相雑音を持つ信号波形 $V(t)$ を、理想的な正弦波の位相項に位相変動 $\phi(t)$ を加えた形で表現しています。位相雑音と位相ジッタは位相変動 $\phi(t)$ を周波数領域および時間領域で求めたものです。

$$V(t) = (V_0 + \varepsilon(t))\sin(2\pi f_0 t + \phi(t)) \quad \varepsilon(t): \text{振幅変動}, \quad \phi(t): \text{位相変動}$$



- ・位相の瞬時値
 $\Phi(t) = 2\pi t + \phi(t)$
- ・周波数の瞬時値
 $f(t) = f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt}$

図 5: 位相変動を含む出力電圧

位相雑音は位相変動 $\Phi(t)$ の周波数領域で表現したものであり、 $\Phi(t)$ のパワースペクトル密度 S_Φ で定義されます。実用上は、単側波帯で表した SSB(Single Sideband)位相雑音 $L(f)$ が一般的に使用され、キャリア信号のトータル電力に対する比をキャリア周波数からのオフセットを横軸に dBc/Hz で表します。

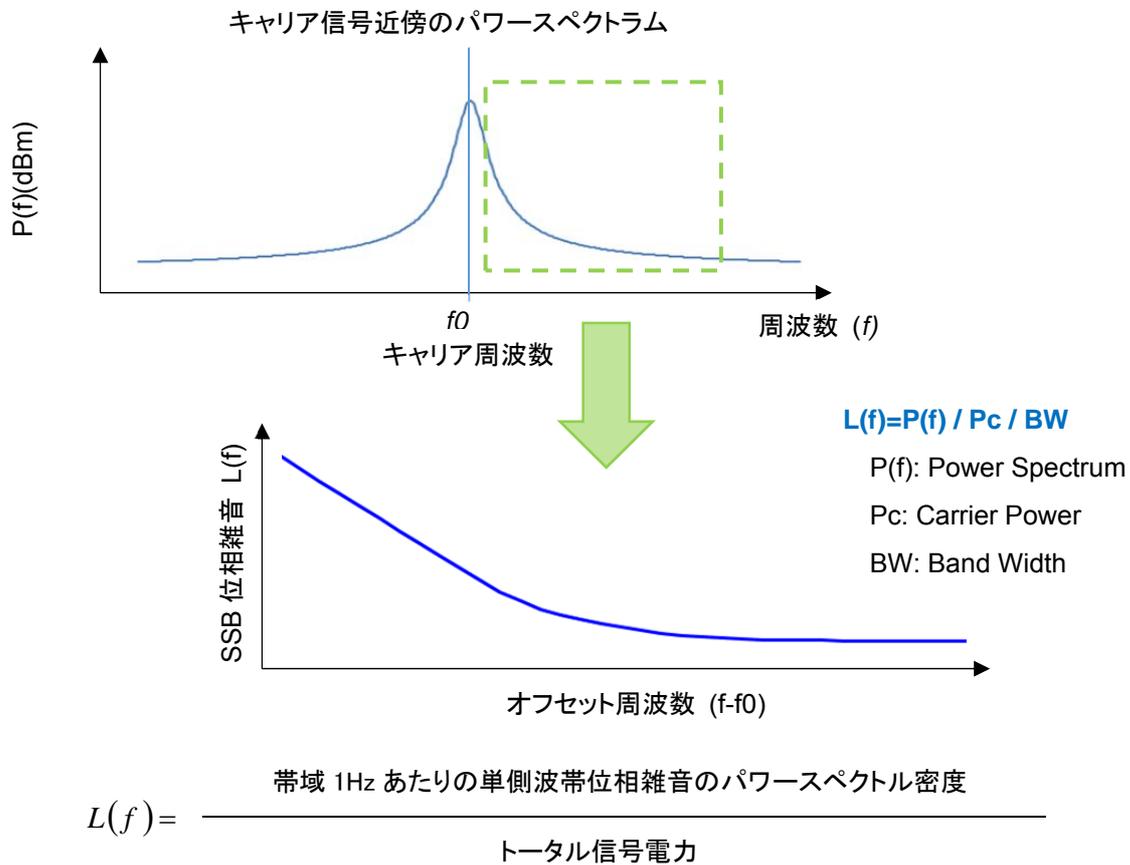


図 6 : SSB 位相雑音

位相ジッタは位相変動を時間軸で表現した雑音の指標であり、 $\Phi(t)$ そのものと言えます。位相ジッタの RMS 値は $\Phi(t)$ の 2 乗平均

$$J_{rms} = \langle \phi^2(t) \rangle^{1/2}$$

で与えられます。しかし、 $\Phi(t)$ を時間領域で精度よく測定することは困難であることから、通常は位相雑音を測定し以下に示す方法で位相ジッタに換算する方法が用いられます。

位相変動のパワースペクトル密度 S_Φ は片側側波帯で評価した SSB 位相雑音 $L(f)$ との間には近似的に

$$L(f) = S_\phi(f) / 2$$

の関係が成り立ちます。このとき位相ジッタは位相雑音 S_Φ の測定値を指定されたオフセット帯域幅の区間で積分することにより得られます。

$$J_{rms} = \frac{1}{2\pi f_0} \left[\int_{f_1}^{f_2} S_\phi(f) dt \right]^{1/2}$$

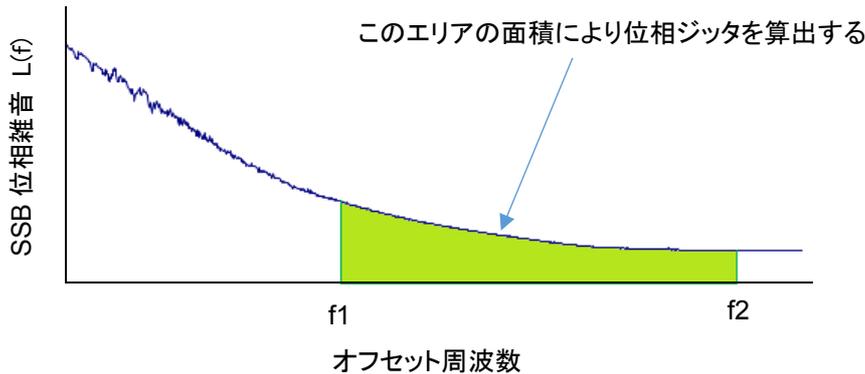


図 7:SSB 位相雑音から位相ジッタの算出

(3) 雑音性能の優れたクロック信号を得るには

水晶発振器の位相雑音は水晶振動子の Q 値と信号レベル、発振回路の雑音性能によって大部分が決まります。位相雑音のキャリア周波数近傍の位相雑音を良くするには、特に水晶振動子の Q 値が重要となります。信号レベルは大きいほどオフセット周波数によらず位相雑音レベルは低減します。システムとして可能範囲で信号レベルを大きく設定することで位相雑音を低減できますが、水晶振動子に印加可能な励振レベルには上限があります。励振レベルが大きすぎると不要な振動モードが発生し発振状態に異常をきたす可能性があります。

オーバートーンは高い Q 値が得られ、オフセット近傍には有効ですが、水晶および発振回路の抵抗損失が大きくなることや高い励振レベルで動作させると周波数変動が大きくなり信号純度が劣化するため注意が必要です。また、電力が大きくなるほど水晶振動子の非線形性による周波数変動が大きくなるため、過大な励振レベルでの動作は位相雑音の劣化要因ともなります。雑音性能が優れた半導体デバイスを選択することが重要です。フリッカ雑音はオフセット周波数がキャリア近傍から 10kHz 程度の中間周波数付近に影響し、熱雑音は信号レベルと同様オフセット全帯域で均等に影響します。

～良好な位相雑音を得るために～

1. 発振回路の Q 値を確保

水晶振動子の Q 値を高いほど、また発振回路の抵抗損失は小さいほど、発振ループの Q 値は高くなります。

2. デバイスの低雑音化

熱雑音、ショット雑音、フリッカ雑音などの半導体の発生する雑音を低減するため、雑音指数 NF、フリッカコーナ一周波数の低いデバイスを選択してください。

3. PLL 回路による周波数逡倍は位相雑音劣化の原因になります。

4. 発振回路の励振レベルは許容できる範囲で大きくしてください。

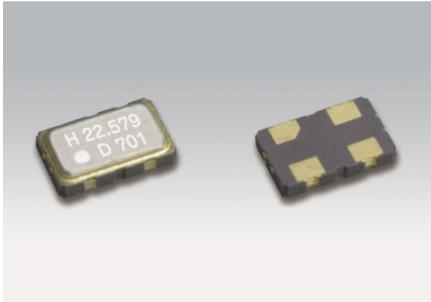
5. 雑音特性は信号レベルと雑音電力との相対値なので、信号レベルが大きいほど有利になります。

ただし、水晶振動子の励振レベル特性を平坦な領域で使うことが条件になります。

6. オーバートーンは高い Q 値が得られ、オフセット近傍には有効です。ただし、水晶および発振回路の抵抗損失が大きくなることや高い励振レベルで動作させると周波数変動により位相雑音が劣化するため注意が必要です。

7. 適宜、バイパスコンデンサを電源、GND 端子に最短距離で配置し電源雑音を抑制してください。

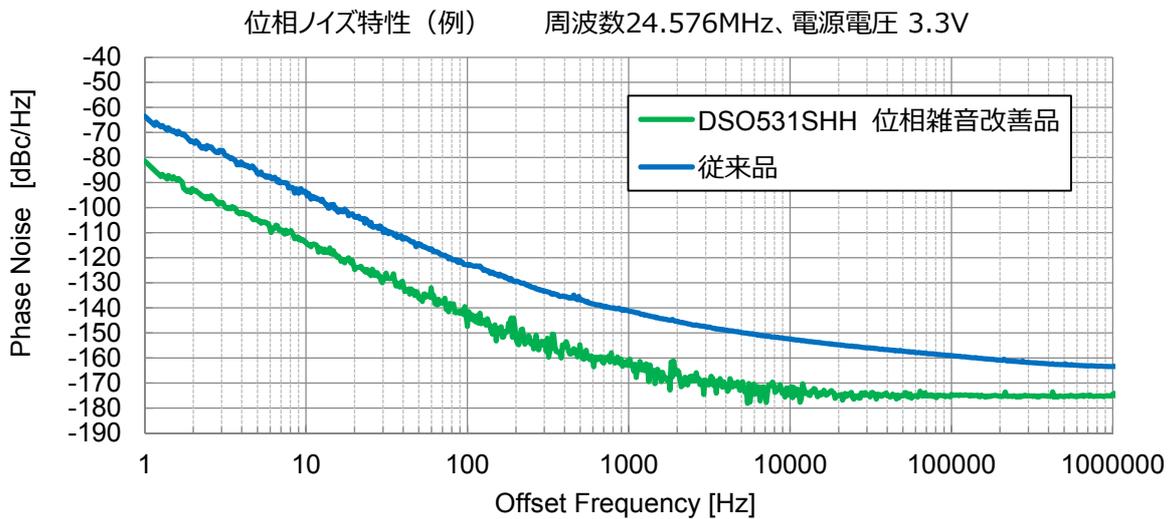
◆新製品紹介 DSO531SHH



デジタルオーディオでは DA コンバーターに使用する基準クロック信号の持つ位相雑音によって音質が劣化することが知られていますが、「DSO531SHH」はオーディオ用途に特化して開発し、優れた雑音性能を持つ水晶発振器です。発振回路に低ノイズプロセスを採用するとともに、水晶振動子のパラメーターに合わせて振動レベル、負性抵抗などを最適化して低位相雑音化した発振回路(IC)を採用することで当社従来機種と比較して、10~20dB 程度の低位相雑音化を実現しました。RMS ジッタについても

回路設計を見直し 1/3 程度に低減させ、その優れた信号品質により、デジタルオーディオ機器の音質向上に貢献します。5.0×3.2mm(5032 サイズ)のセラミックパッケージを採用することで、ポリュームゾーンである小型の 3.2×2.5mm(3225 サイズ)や 2.0×1.6mm(2016 サイズ)などと比較し、熱揺らぎ、機械振動による信号の変動を低減しました。また、水晶振動子の設計を最適化することによって高ドライブ域での近傍位相雑音の劣化を防ぎ、全帯域で安定して良好な特性が得られます。

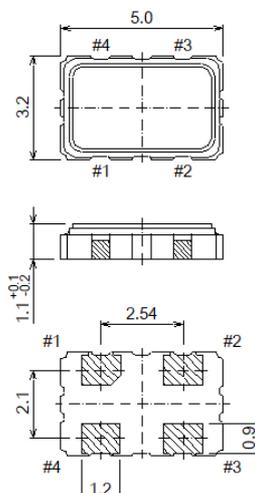
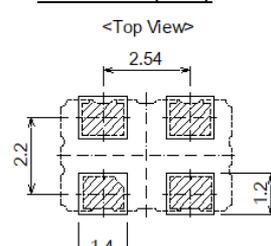
当社は、これからもお客様のニーズにお応えするユニークな製品を開発してまいります。



項目	単位	DSO531SHH 位相雑音改善品	当社従来品	△ 改善幅	条件
位相ノイズ	dBc/Hz	-77.9	-63.7	-14.2	Offset: 1Hz
		-111.5	-92.2	-11.3	Offset: 10
		-141.9	-123.3	-15.1	Offset: 100
		-159.2	-140.2	-18.7	Offset: 1,000
		-182	-151.4	-21.2	Offset: 10,000
		-175.2	-158.6	-13.6	Offset: 100,000
		-175.3	-162.9	-7.7	Offset: 1,000,000
位相ジッタ(RMS)	ps	0.07	0.27	-0.2	BW: 12k ~ 5MHz

図 8: 位相ノイズ、位相ジッタ

表 1:DSO531SHH 電気的特性仕様

項目	単位	仕様											
出力周波数範囲	MHz	20 ~ 50											
周波数安定度	$\times 10^{-6}$	± 50 / $-40 \sim +85^{\circ}\text{C}$											
		± 30 / $-20 \sim +70^{\circ}\text{C}$											
電源電圧	V	+ 1.8 ~ 3.3											
消費電流	mA	+ 2.7 / $V_{\text{CC}}=1.8\text{V}$											
		+ 7.7 / $V_{\text{CC}}=3.3\text{V}$											
波形シンメトリ	%	45 ~ 55											
出力波形		CMOS											
0 レベル電圧/1 レベル電圧		0.1 V_{CC} / 0.9 V_{CC}											
出力負荷	pF	15 max.											
位相ノイズ (出力周波数: 24.576MHz)	dBc/Hz	-160 typ. / $V_{\text{CC}}=3.3\text{V}$, Offset 1kHz											
		-172 typ. / $V_{\text{CC}}=3.3\text{V}$, Offset 100kHz											
		-158 typ. / $V_{\text{CC}}=1.8\text{V}$, Offset 1kHz											
		-166 typ. / $V_{\text{CC}}=1.8\text{V}$, Offset 100kHz											
出力制御		イネーブル/ディスエーブル機能 (3 ステート)											
外形寸法図	mm	<p>外形寸法</p> 	<p>端子接続</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Pin No.</th> <th>Connection</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>#1</td> <td>OE(Output Enable)</td> </tr> <tr> <td>#2</td> <td>GND</td> </tr> <tr> <td>#3</td> <td>Output</td> </tr> <tr> <td>#4</td> <td>Vcc</td> </tr> </tbody> </table>	Pin No.	Connection	#1	OE(Output Enable)	#2	GND	#3	Output	#4	Vcc
		Pin No.	Connection										
#1	OE(Output Enable)												
#2	GND												
#3	Output												
#4	Vcc												
		<p>ランドパターン(参考)</p> <p><Top View></p> 											

<製品購入に関するお問い合わせ先>

第三営業部

Tel : 079-425-3161 Fax : 079-425-1134

[メールでのお問い合わせはこちら](#)