

# 通信システムに必要な信号品質と基準信号源(2)

## 発振器の構造から得られる位相雑音特性の解説

### 【序文】

高速通信伝送ネットワークで取り扱う信号は、通信プロトコルによってビットエラーレート(以下 BER) (送受信を行なう際に、受信側で受けたデータのエラービット数を、送信されたデータの総ビット数で割ることによって算出されるビット誤り率のこと)などの信号品質の性能が必要になります。そのためシステム設計者は、ASIC の設計、基板レイアウト設計、部品変更など信号品質を劣化させない設計を求められています。高品質な信号品質を維持するためには、基準信号源そのものの持つノイズやジッタの性能が重要なパラメータとなるため、前回のホワイトペーパーでは通信システムに必要な信号品質から求められる発振器のキースペック、市場に出回る発振器の構造や特徴から通信機器に適したエプソン製品を紹介しました。今回は市場における発振器構造の違いによる位相雑音特性に関し詳しく解説します。

### 【市場における発振器(基準信号源)の構造・特徴】

市場で利用されている発振器の構造(タイプ)を図 1 に、特徴を表 1 に示します。

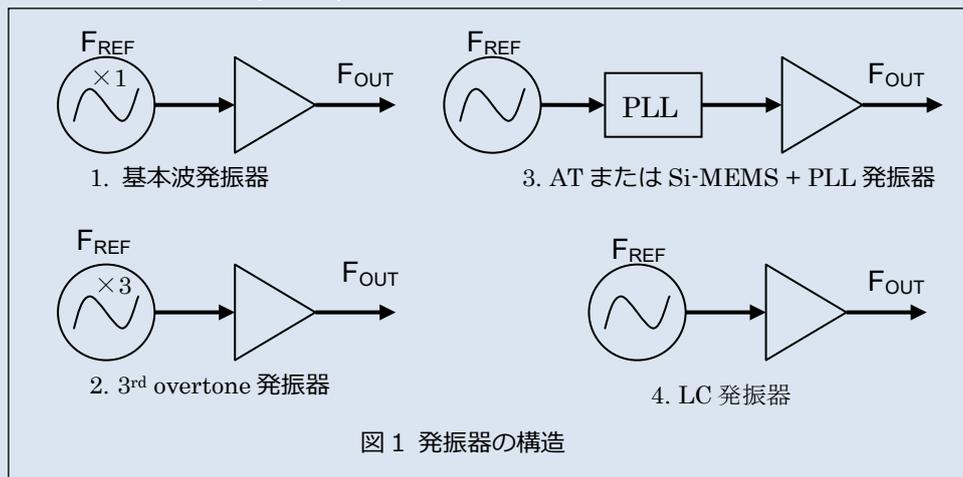


図 1 発振器の構造

表 1 発振器構造の違いによる特徴

発振器の構造(種類)	特徴
基本波発振器	ノイズ、ジッタ、スプリアス特性に優れる。回路構成もシンプルで消費電流も小さい。
オーバートーン発振器	ノイズ、ジッタ、スプリアス特性に優れるが、回路設計(構成)が複雑で難しく、消費電流が大きくなってしまったり、容量比が大きくなるので周波数可変幅が取りにくい。
PLL 発振器	PLL にて任意の周波数を容易に得られるが、回路構成が複雑になり消費電流が大きくなることや、ノイズやジッタ性能にも悪影響を及ぼす。
LC 発振器	L と C で単純に構成でき出力振幅も大きくとれるが、消費電流が大きく、材料の持つ周波数安定度やエージングが悪い場合ノイズも多い。

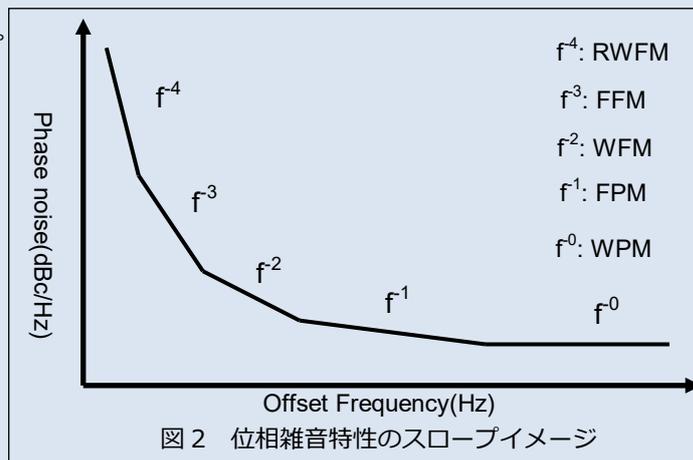
特徴に示すように発振器の構造によって、得られる特性が変わります。今回は通信システムの信号品質に大きな影響を及ぼすノイズ・ジッタの観点から、基本波発振器、PLL 発振器、LC 発振器の位相雑音特性の特徴と傾向を詳しく解説します。

## 【位相雑音特性スロープの特徴】

位相雑音特性は図 2 に示すようなスロープイメージを持っています。このスロープは大きく 5 つに分類され、それぞれが以下のような特徴を持っています。その特徴を簡単に解説します。

- 1) ランダムウォーク周波数変調雑音(RWFM : Random Walk Frequency Modulation)は、オフセット周波数の 4 乗に反比例したスロープを持ち、主に源振の周波数変動(位相変化が周波数変化に変換される)の影響を示します。
- 2) フリッカー周波数変調雑音(FFM : Flicker Frequency Modulation)は、オフセット周波数の 3 乗に反比例したスロープを持ち、主に源振からのフリッカー雑音の影響を示します。
- 3) 白色周波数変調雑音(WFM : White Frequency Modulation)は、オフセット周波数の 2 乗に反比例したスロープを持ち、主に回路側の Q 値の影響を示します。
- 4) フリッカー位相変調雑音(FPM : Flicker Phase Modulation)は、オフセット周波数に反比例したスロープを持ち、フリッカー FM 雑音同様物理的な発振側(回路側)からの雑音の影響を示します。
- 5) 白色位相変調雑音(WPM : White Phase Modulation)は、オフセット周波数には無関係な一定したスロープを持ち、主に回路からの雑音(部品の熱雑音系)と発振信号の S/N 比の影響を示します。

以上のように位相雑音特性のスロープイメージは大きく分類すると RWFM、FFM は源振依存、WFM、FPM、WPM は回路依存の影響であると言えます。

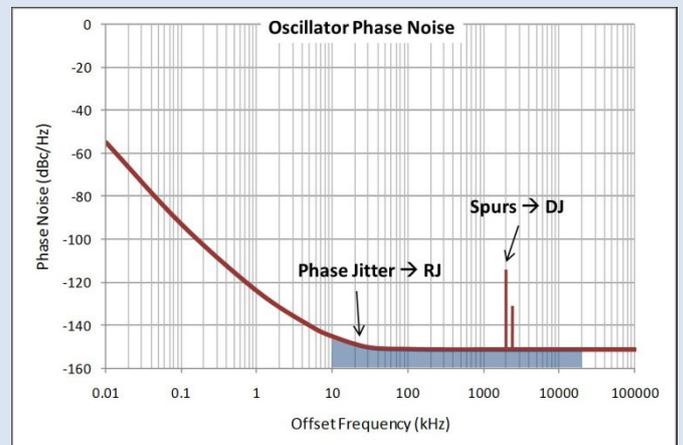


## 【位相雑音特性からの位相ジッタ算出方法】

位相ジッタは位相雑音特性の特定のオフセット周波数範囲の積分値から求めることができます。通信システムの性能を左右するのは、通信ループ帯域内での位相ジッタ量になりますが、多くの通信システムの通信ループ帯域内に相当する 12k~20MHz での位相ジッタ量(SONET SDH の規格)が現在では位相ジッタの重要な指標の 1 つとなっております。

図 3 に位相雑音特性と位相ジッタの関係を示します。

総合ジッタ TJ(Total Jitter)は DJ(Deterministic Jitter)と RJ(Random Jitter)との総和で表されますが、図 3 のような位相雑音特性を持つシステムでは、通信ループ帯域内に相当する 12k~20MHz(図 3 の青色部分)の積分値(RJ)と、スプリアスの積分値(DJ)の総和がトータルの位相ジッタ量に相当します。



## 【発振器構造の違いによる位相雑音特性】

ここでは発振器構造の違いによる位相雑音特性の特徴を理解して頂くために、図1で紹介した構造を元に、「水晶振動子を源振にした基本波発振器」、「Si共振子を源振にPLLを使ったSi-MEMS発振器」、「LC発振を源振としたLC発振器」の3つの発振器に対する位相雑音特性の傾向を解説します。そこで水晶、Si共振子、LC発振それぞれ源振の持つ位相雑音特性イメージを図4に示します。

まずキャリア近傍(低域側)でのスロープ傾きの違いは源振の持つQ値が大きく依存しています。特にQ値の高い水晶はオフセット周波数100kHz程度までは低位相雑音特性を有しており、Q値が数十程度と極端に低いLC発振はキャリア近傍(低域側)の位相雑音特性は悪化する傾向となります。またそれとは対照的にスロープの高域側は、源振に関係なく、回路から発生する雑音等に大きく依存するため、信号成分が雑音成分よりも大きければフロアレベルがより低い傾向を示します。特にLC発振は出力振幅が大きく信号強度も強くなるため、高域側での位相雑音は小さくなる傾向にあります。それと比較してSi共振子はかけられるパワーに制限があるため、出力振幅が小さく、信号強度が弱いため高域側では水晶やLC発振とは対照的に不利となります。もちろん高域側での位相雑音低減の手段として、消費電流を大きくすることにより信号強度を上げフロアレベルを下げることもできます。この場合位相雑音を良くすることと低消費電流を維持することは互いにトレードオフの関係になります。

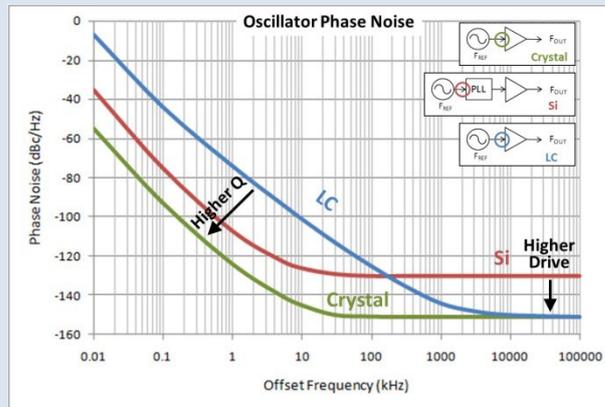


図4 源振の持つ位相雑音特性イメージ

(右上の発振器ブロック図における、緑、赤、青の○で囲んだ部分での位相雑音特性イメージ)

ここまで源振に関する位相雑音特性イメージを見てきました。この中でSi共振子に関しては、結晶本来の持つ温度特性の変動量が大きいため、発振器として構成するには、その温度依存性を補正し安定性を確保しなければなりません。そのため多くの補正回路にはPLLが使用されています。そこでSi共振子の源振にPLL回路を通した位相雑音特性イメージに関して図5で解説します。

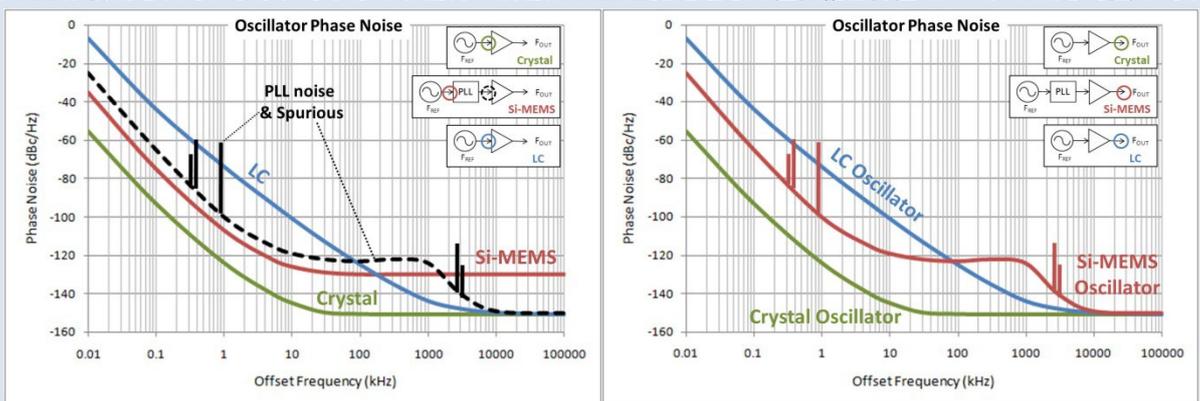


図5 PLL回路の位相雑音特性イメージ(左)と、発振器構成の相違による位相雑音特性の傾向(右)

図5(左)に示すようにPLL回路を使う発振器は位相雑音曲線の一部が持ち上がる(dip)特性になります。これはPLLが電圧制御発振器(以下VCO)に対し源振でロックをかけ、通倍された周波数を出力する仕組みのため、PLL回路を用いた位相雑音特性はVCOとPLLの2つの要素の影響を受けることになるからです。一般的にVCOは水晶の源振よりも位相雑音特性が劣り、PLLでは高域側でVCOの位相雑音特性が現れるのでこのような特性となります。さらに通倍数で低域側の位相雑音レベルも変化

するため、通倍数が多いほど位相雑音特性は劣化する傾向にあることや、PLL や通倍により発生するスプリアスにより劣化する傾向もあります。またさらに高域側では回路の出力振幅により特性が決まるため、源振に関係なくどれも一定となります。

最終的に「水晶振動子を源振にした基本波発振器」、「Si 共振子を源振に PLL を使った Si-MEMS 発振器」、「LC 発振を源振とした LC 発振器」の3つの発振器出力に対する位相雑音特性の傾向は図5の右図のようにまとめられます。

#### 【位相雑音特性から見える高速通信システムに必要な発振器構造】

発振器構造の違いにより位相雑音特性の傾向が変わることを解説してまいりましたが、設計者がシステム設計を行う際、キャリア近傍(低域側)のノイズ特性(図6左)が重要なのか、また SONET SDH のような通信ループ帯域内(12k~20MHz)に相当する位相ジッタ量(図6右)が重要なのかにより、使用する電子部品の選定、基板レイアウトや ASIC の設計を考慮することになります。高速通信システムの設計では Si-MEMS 発振器のようなリスク要素の大きい製品(PLL 回路特有の位相雑音曲線の持ち上がりやスプリアスの発生)や LC 発振器のような周波数安定度の悪い製品を使用するよりも、低位相ジッタ特性を有し、周波数安定度の良い基本波水晶発振器を使用するほうが通信システムとしての総合安定度が得られると考えております。

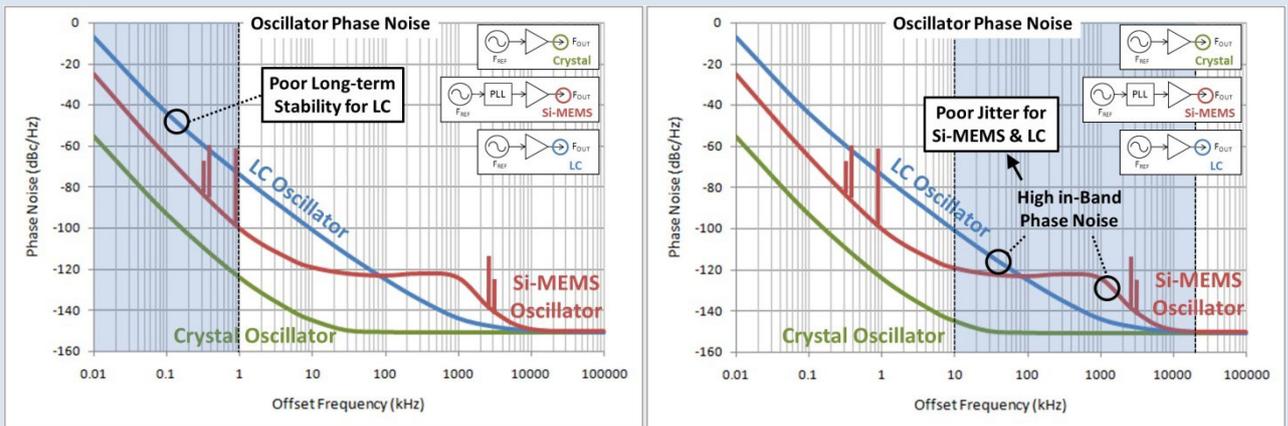


図6 キャリア近傍(低域側)特性(左)とフロアレベル(高域側)特性(右)での比較

私たちエプソンの水晶を源振とした発振器は、キャリア近傍(低域側)からフロアレベル(高域側)まで安定した位相雑音特性を持つことを特徴としており、基本波発振では回路構成もシンプルなため消費電流も低く抑えることができます。今後ますます高速化していく通信システムにとって、水晶を源振とした基本波発振器は、システム構成には欠かせないキーパーツとなっていくことでしょう。今後もエプソンはお客様にとって必要な性能を追求した製品の開発に取り組んでまいります。