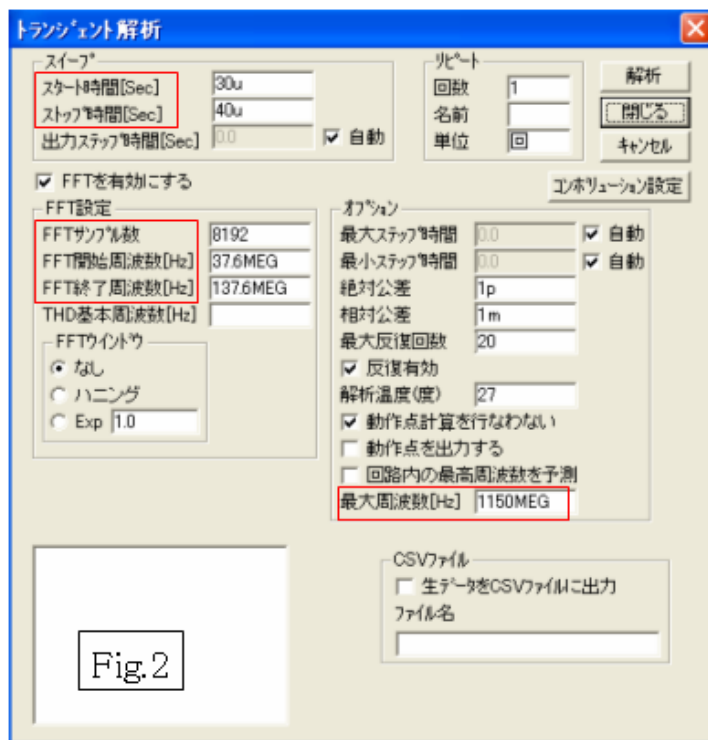
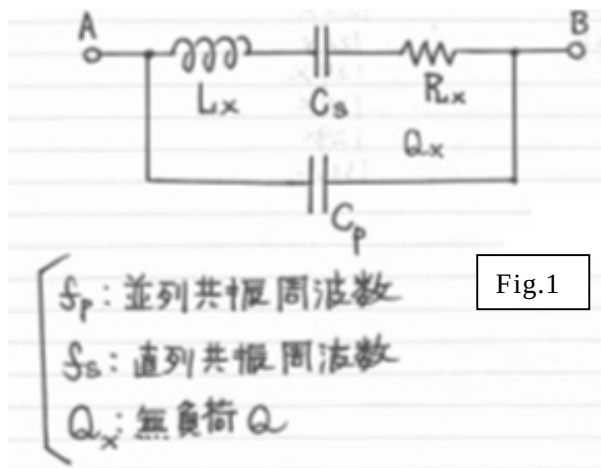


水晶発振器が寄生発振を生じる要因を、Transient 解析と実機測定評価の比較検証によって明らかにし、水晶発振器の信頼性・品質を向上する設計手法を導出する

1. 序文

水晶発振器が温度／電源等の環境変化、或いは経時変化などの影響を受け、その発振安定度に変化を生じて、マルチ・スプリアス状やノイズ包絡線状の寄生発振を発生することが、経験的に知られている。

- ① 水晶発振回路は、High Q で周波数選択度が先鋭な水晶振動子を、発振帰還系に適用することによって、発振周波数選択度が高い、シャープな出力スペクトラムを適切に得ることができる。
- ② その反面で、発振帰還系を含む発振回路に、意図していない寄生インピーダンスが多少でも包含される場合には、発振機構が正規発振モードから異常発振モードに比較的容易にシフトしてしまう、虞が少なくとも存在する。
- ③ 特に、水晶振動子[Fig.1]の Q_x が 1 万～数万程度と比較的に低い状態(直列抵抗 R_x = 数十～百数十 Ω)で、且つ並列容量 C_p が基準に比べて多少(数十%)大きい場合には、寄生発振状態に陥り易い傾向が見られる。
- ④ 水晶発振回路の発振用トランジスタの発振能力[高周波性能]が、過不足なく適正な範囲に収まっているときは、比較的に安定な発振出力が得られる。しかし、高周波性能が過剰に高い[大間かに言えば、トランジション周波数 $f_T \geq$ 発振周波数 $f_o \times$ 十数倍]トランジスタを使用した場合には、正規発振周波数の高調波領域[整数倍]で発振する、或いはスプリアスが高調波領域に発生する傾向が垣間見られる。
- ⑤ 上記を要約すれば、水晶振動子は適正な特性のものを使い、発振トランジスタも適正な発振能力を有するものを選定することが、水晶発振器の発振安定度を保持し、その信頼性を向上させると考えられる。



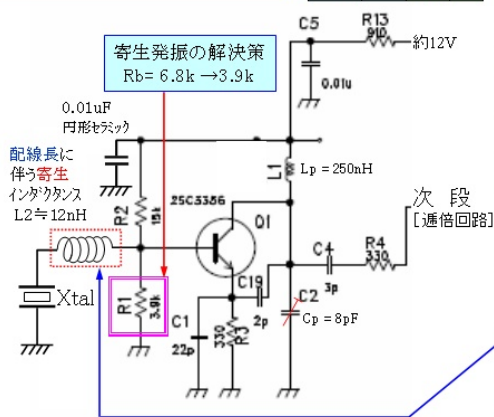
2. 水晶発振回路出力スペクトラム解析に対する SNAP シミュレーション上の要点

(1)水晶振動子の部品ライブラリーとしての Symbol や Macro については、以前の報告書に詳記

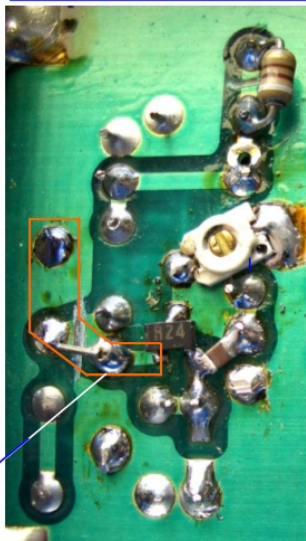
1. 水晶発振器の回路と基板実装

Fig.3

(A) 水晶発振器の等価回路



(B) 水晶発振器の実装基板



されているので、ここでは説明を割愛する。

(2)Transient 解析を適用して、水晶発振器の発振出力を時間経過分析する際の要点は以下の通りである。

①水晶発振器の発振周波数 f_0 と水晶振動子の Q を勘案して、発振出力時間波形が概ね定常状態(発振出力振幅の包絡線が安定)に、入っている時間帯にスイープのスタート時間とストップ時間がくるように選定する。

②FFT の解析サンプル数を多く設定すれば、出力スペクトルの分解能 [解析精度] が向上するが、解析の所要時間が長時間に亘るので、一般に 2^n の整数として 2,048—8,192 の範囲に選ぶ。

③出力スペクトルを観測したい周波数範囲になるように、FFT 開始周波数 [観測域下限] と FFT 終了周波数 [観測域上限] を設定する。

④最大周波数を大きくすれば FFT の解析次元が増大して、分解能を向上するが、解析所要時間が増大するので、発振周波数の十倍程度に設定すれば、略十分な解析精度が得られる。

⑤上記①から④の条件を適用すると、100MHz 程度の発振周波数の場合において、通常は数分程度の Transient 解析所要時間と、数分程度のグラフ計算・表示時間が必要になる。[時間波形表示 $\geq$ スペクトラム表示 $\times 2$ 倍] 更に、発振回路に分布定数線路 [寄生インダクタンス等] が加わると、解析所要時間は凡そ十倍~二十倍に急増大し、1 回の所要時間が 1 時間程度に至ることが多々生じる。

1. 対象水晶発振器の回路構成

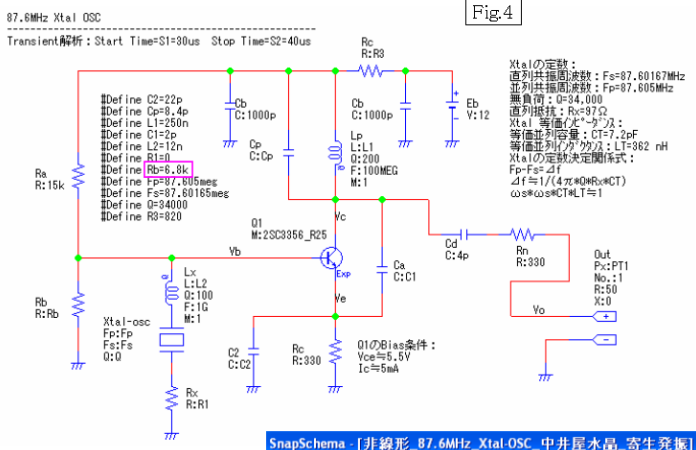


Fig.4

SnapSchema [非線形_87.6MHz_Xtal-OSC_中井屋水晶_寄生発振]

3. マルチ・スプリアス状寄生発振が生じる水晶発振器のシミュレーション解析および実機評価

3.1 水晶発振回路の実機による寄生発振の要因と解決策

2. 同発振器の出力スペクトラム

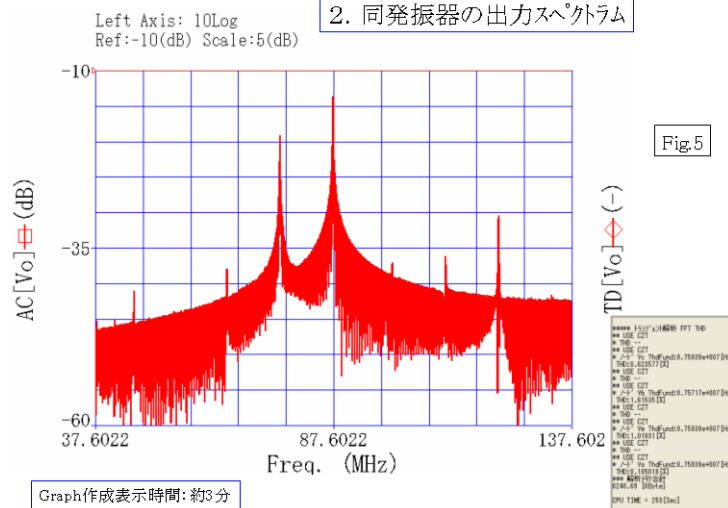


Fig.5

1. 対象水晶発振器の回路構成

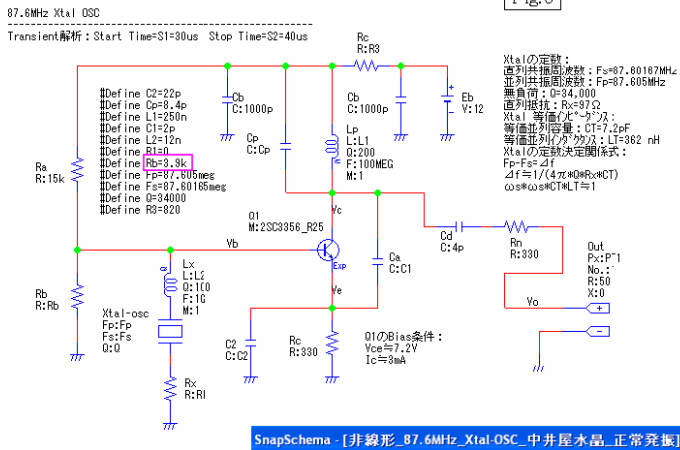
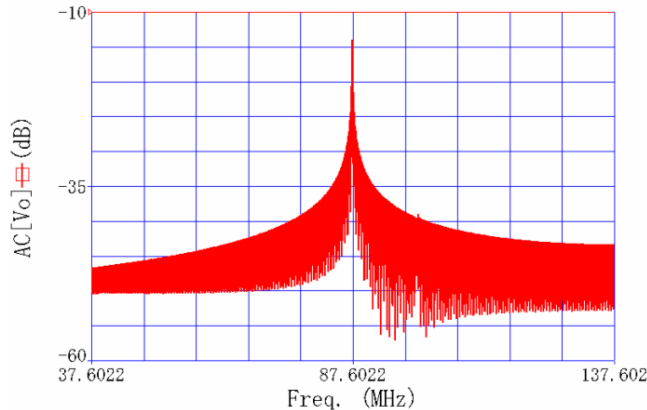


Fig.6

Fig.3 に示すように、発振トランジスタから水晶振動子に至る接続ライン長に伴って、寄生インダクタンス L_2 12nH が存在すると、同トランジスタ 2SC3356 [高周波性能が過剰傾向] のバイアス条件によって、寄生発振が生じることを実測確認している。

3.2 同水晶発振回路を Transient 解析した結果の要点分析

- (1) 寄生インダクタンス L2 を伴った水晶発振回路 [Fig.4] を Transient 解析すると、87.6MHz の基本波の[°] トラムの周囲に、多数のマルチ・ス[°] リアスを擁する寄生発振出力[Fig.5]が得られる。このとき発振トランジスタの自己バイアス [発振整流電圧を除いて] は $V_{ce} = 5.5V$ 、ミッタ電流 $I_e = 5mA$ になっている。



2. 同発振器の出力スペクトラム

- (2) ベース分圧抵抗 $R_b=R_1$ を $6.8\text{K}\Omega \rightarrow 3.9\text{K}\Omega$ に減らして、発振トランジスタの自己バイアス条件を、 $V_{ce} = 7.2\text{V}$ 、エミッタ電流 $I_e = 3\text{mA}$ に変更[Fig.6]すると、その発振出力は単一基本スペクトラムの正常発振出力[Fig.7]に改良される。

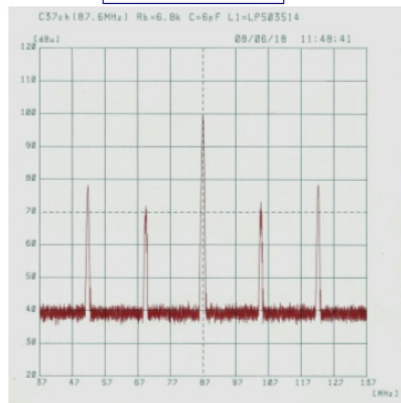
3.3 SNAP シミュレーション解析と実機測定評価の比較検証

- (1) 水晶発振器の実測データと前記の Transient 解析結果を比較すると、Fig.8 に示すように、寄生発

2. 水晶発振器出力の実測データ

振状態の発振出力ス[°]クラムと
正常発振状態の発振ス[°]クラム
は、両者に良好な相関が存在
していることが判る。

R1 = Rb = 6.8 kΩ
寄生発振



$R1 = Rb = 3.9\text{ k}\Omega$
正常発振

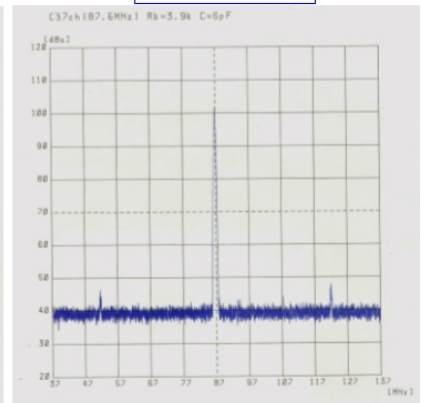


Fig.8

- (2) 水晶発振器で発生した寄生発振を、SNAP シミュレーション解析で再現すると共に、寄生発振の解決策「発振トランジスタのバイアス変更」を同解析シミュレーションで見つけ出し、その効果を実際の水晶発振器で確認することが

3. 寄生発振を生じた水晶発振器の回路構成

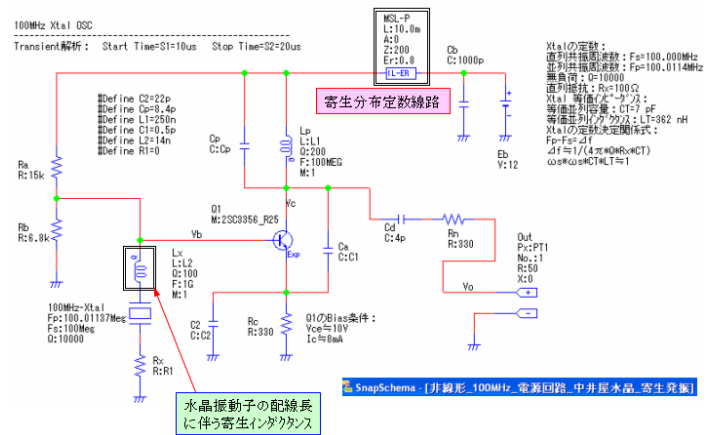
Fig.10

出来た。

(3) 水晶振動子の電気特性〔実測パラメータ〕を、水晶振動子の直並列共振等価回路に置換し、水晶振動子の接続ライン長に伴って発生する寄生インダクタンスを付加した水晶発振回路を SNAP 回路図に形成する。

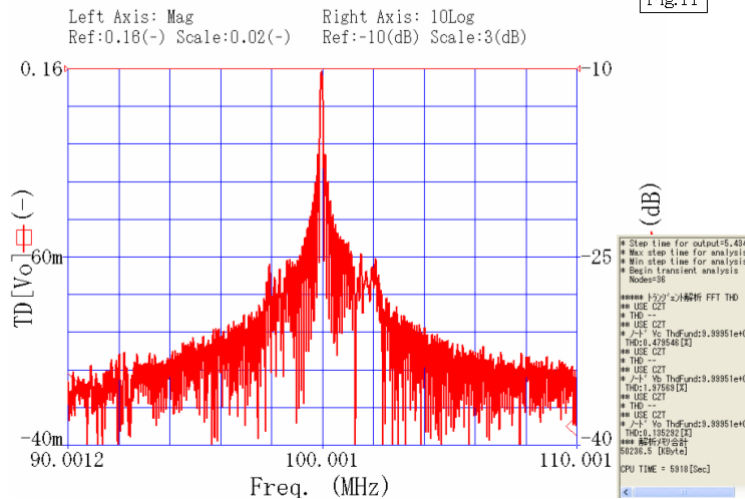
同回路図について、Transient 解析を実行すると同回路図の条件に応じて、実際の水晶

発振器で実測評価した出力スペクトラムと、類似の出力スペクトラムが得られることを比較検証した。



4. 同水晶発振器の寄生発振出力

Fig.11

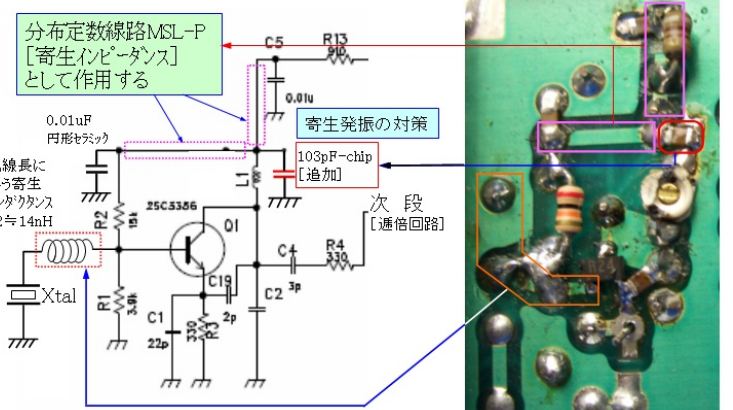


6. 水晶発振器一寄生発振の解消対策

Fig.9

(A) 水晶発振器の等価回路

(B) 水晶発振器の実装基板



(4) 実際の水晶発振器の回路構成を反映した SNAP 回路図を解析することで、寄生発振等の不安定発振を解決する方法や、温度変化等の環境変化或いは、経時変化によって発生する発振変化・異常を前以て、予知・予防できる可能性を見出した。これによって水晶発振器の品質向上や、信頼性向上を図ることができると思われる。

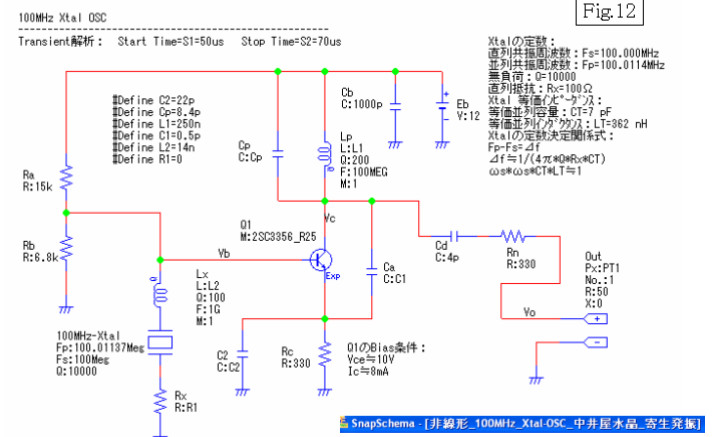
4. 包絡線ノイズ状寄生発振が生じる水晶発振器のシミュレーション解析と実機の比較評価

4.1 水晶発振回路の実機による寄生発振の要因と解決策

Fig.9 に示すように、発振トランジスタから水晶振動子に至る接続ライン長に伴って、寄生インダクタンス $L2 = 14\text{nH}$ が存在し、さらに電源

1. 寄生発振を解消した水晶発振器の回路構成

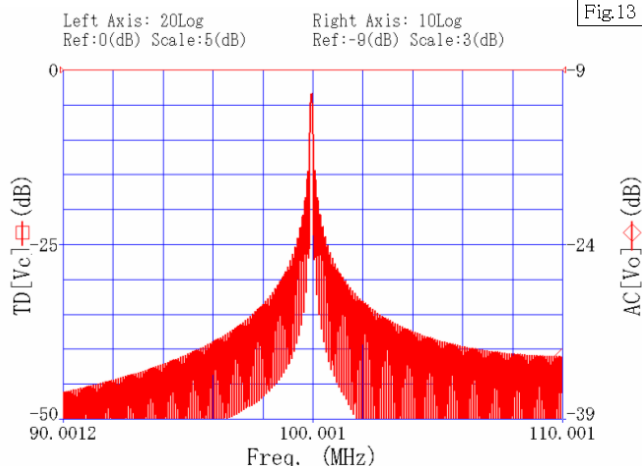
Fig.12



ラインに寄生分布定数線路MSL-Pが存在して、電源インピーダンスが高い状態の水晶発振回路では、包絡線ノイズ状の寄生発振が発生することを実機で確認している。

2. 寄生発振を解消した水晶発振器の正常出力

Fig.13



4.2 同水晶発振回路を Transient 解析した結果の要点分析

(1)寄生インダクタンス L2 と寄生定数線路 MSL-P を擁する、水晶発振回路[Fig.10]を Transient 解析すると、基本波発振スペクトラムの周囲にノイズが包絡線状に生じた寄生発振出力[Fig.11]が観測される。

(2)電源ラインと水晶発振回路の交点にチップコンデンサ 10⁴pF を付加して、電源インピーダンスを十分に低くすると、寄生インダクタンス L2 が存在したままの水晶発振回路[Fig.12]が正常発振になり、基本波発振スペクトラム単独の正常スペクトラム[Fig.13]が得られる。

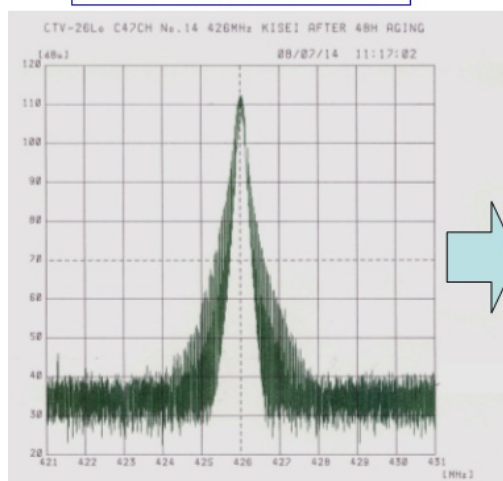
4.3 SNAP シミュレーション解析と実機測定評価の比較検証

5. 水晶発振器の寄生発振解消対策

Fig.14

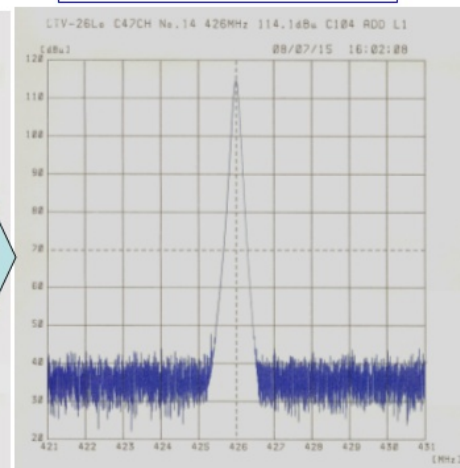
(1) 水晶発振器の実測データ [Fig.14] と 前 記 の Transient 解析結果 [Fig.11&Fig.13]を比較すると、寄生発振状態の発振出力スペクトラムと正常発振状態の発振スペクトラムについて、両者に良好な相関が存在していることが判る。

① 寄生発振出力(改良前)



CENTER:426MHz SPAN:10MHz
水晶発振周波数の4通倍出力

② 正常発振出力(改良後)



CENTER:426MHz SPAN:10MHz
水晶発振周波数の4通倍出力

(2) 水晶発振器で発生した寄生発振を、SNAP シミュレーション解析で再現すると共に、寄生発振の解決策「電源と水晶発振回路の交点にコンデンサを付加して、寄生分布定数線路を除去」を同解析シミュレーションで見つけ出し、その効果を実際の水晶発振器で確認することが出来た。

5. 水晶発振器の信頼性を向上させる SNAP シミュレーション解析の効果

- (1)水晶発振器の寄生発振に対して、SNAP シミュレーション [Transient]解析は、実機と同様に「ノイズ重畳包連線」や「マルチ・スプリアス」の寄生発振スペクトラムを、精度良く発生・再現できることを確認・検証した。
- (2)SNAP シミュレーション解析の結果、「ノイズ重畳包連線」型の寄生発振は、以下の 2 条件が水晶発振回路に同時発生した場合に限って、発生することを明らかにした。
 - ①発振トランジスタから水晶振動子に至る接続回路に、およそ 10nH 以上の寄生インダクタンスが存在する。
 - ②電源ラインのインピーダンスが発振周波数帯付近で低インピーダンスに至らず、電源から水晶発振回路に至る電源ラインが、高インピーダンス分布定数線路 [特性インピーダンス $Z_0 \times$ 線路長 $L \geq 1500 \Omega/\text{mm}$] として作用する。
- (3)水晶発振回路の品質向上、即ち環境変化／経時変化など、設計・製造或いは出荷検査等で予知できない、寄生発振等の突発的な発生を予防するために、SNAP Simulation 解析を活用することにより、回路設計等の製品開発ステップにおいて、寄生発振等の不安定要因を抽出・解消、或いは低減できることが明らかになった。
- (4) 高周波機器の開発・設計段階から、製品品質の向上を図るために、高周波シミュレーション SNAP の更なる有効利用を進めて行きたい。

—以上—