

S1-2

水晶デバイスを用いた次世代無線機器用発振器とその性能評価装置の開発およびセンサへの応用

Development of Quartz Crystal Oscillator for Next Generation Wireless Communications and Application to Sensor

○今池健¹Takeshi Imaike¹

Abstract: Many quartz crystal devices are used for wireless communication equipments, especially quartz resonators and crystal oscillators are indispensable. As the development of next-generation wireless communication systems advances, low phase noise and high frequency local oscillators are required. This paper describes low phase noise technique of a high frequency crystal oscillator. In addition, it shows application of a crystal oscillator to a micro mass detection sensor.

1. はじめに

1880 年に水晶の結晶に圧力を加えると電圧が発生する圧電現象が Paul-Jacques Curie と Pierre Curie によって発見され、その翌年には水晶に電界を印加すると変形する逆圧電現象が確認された。この性質は水晶振動子と呼ばれるデバイスに応用され、1921 年には Walter G.Cady により水晶発振器が発明された。その後、無線通信機器へ応用され、第 2 次世界大戦中(1940 年代)には天然水晶の不足が深刻な問題となるに至った。戦後、人工水晶合成法の実用化、トランジスタの発明等により、無線機は大量生産が可能となり、高信頼性、小型化の実現も相まって水晶デバイスは現代においてもスマートフォンに代表される電子機器の動作に必要不可欠なものとして社会を支えている。

スマートフォン（携帯電話）を例に近年の移動通信の動向を振り返ると、日本では 1993 年からデジタル方式のサービス（第 2 世代移動通信：2G）が開始されその後は 3G, 4G(LTE)と発展し、現在は 2020 年に導入予定の 5G の開発が行われている。この約 30 年の間、高速・大容量通信という要求を満たすため、無線信号の基準となる搬送波の高周波化、低位相雑音化に関する研究が行われてきた。

本稿は、著者がこれまでにに行った次世代無線機器用発振器のうち、水晶発振器に関する研究および、その性能評価装置の開発についてまとめたほか、これらの研究により得られた高精度水晶発振器を応用した微小質量センサに関する報告である。

2. 水晶発振器の低位相雑音化手法

2.1 低位相雑音発振器の開発

無線通信に用いられる搬送波周波数は数 10kHz ～ 数 10GHz と様々であり、無線端末は数 10MHz 程度的水晶発振器を局部発振器としその周波数を逡倍するか、

周波数合成（周波数シンセサイザ方式）によって必要な周波数を得ている。発振器の位相雑音電力は逡倍次数の 2 乗に比例して増加するほか、基本波の高調波が逡倍した周波数近傍にスプリアスとして重畳されスペクトル純度が劣化するため、局部発振器は可能な限り高い周波数で発振させ、かつ低位相雑音特性であることが求められる。発振器を増幅器と帰還回路に分けて考えた場合、帰還回路での損失を抑え、低利得な増幅器で発振器を構成した方が位相雑音の CN 比を改善するうえで有利である。また、発振器を構成するトランジスタ等の能動素子は高周波で利得が減少するため、発振回路のループ内での電力損失は最小限にする必要がある。この考え方に基づいて、振動子の損失が最小となる無誘導周波数(fr 周波数)で発振させ、増幅器と帰還回路間でインピーダンス整合条件を満足する Fr 発振器の開発を行った^[1]。Fr 発振器はインピーダンス整合点で閉回路ループを切り離すことで開回路での特性測定においてもインピーダンス整合条件を満足できることに特徴を持つ。これにより、開ループにおいて各々の回路が持つ位相雑音特性から、閉ループにした場合の位相雑音特性を予測できるようになった。この成果は、それまでカットアンドトライで行われていた発振器の開発効率向上に寄与した。詳細は発表時に示す。

2.2 外部水晶共振回路による位相雑音低減手法

前節で述べた手法も含め、過去に行われた低位相雑音化に関する研究の多くは、低位相雑音発振器そのものを開発することが主流であった。これに対し著者は、既存の発振器から一旦出力された信号を低位相雑音化する手法を提案した^[2]。これは、既存の発振器に対して外部基準となる水晶共振回路を用意し、そこで検出した位相揺らぎを負帰還によって安定化するものである。水晶発振器が低位相雑音な理由は、水晶振動子単

1：日大理工・教員・電子

体が有するの無負荷 Q が他の共振素子と比べて桁違いに大きいためであるが、発振回路に接続することで実効的な Q 値、すなわち負荷 Q が低下する。また、発振回路は非線形・大信号動作のため、トランジスタの pn 接合容量が発振信号自身によって動的に変動することで自己変調を起こすため位相雑音の増加は免れない。そこで、提案手法では発振ループ外でトランジスタと組み合わせた水晶共振回路を小信号かつ、負荷 Q を振動子の無負荷 Q に近い条件で動作させる回路構成とした。これにより、水晶発振器の位相雑音特性を改善できることを実証した。詳細は発表時に示す。

3. 全デジタル型位相雑音測定手法

ここまで、発振器の位相雑音低減について述べたが、位相雑音レベルが小さくなるほど、より高精度な測定法が求められる。位相雑音測定とは周期波形の位相揺らぎを測定することであり、揺らぎのない正弦波を基準に、被測定信号との位相差を比較計測するものである。従来は被測定発振器よりも位相雑音特性の優れた同一周波数の基準発振器を用意し、高周波数帯の信号をベースバンドにダウンコンバージョンし低雑音増幅器で増幅後スペクトル解析を行っていた。このとき、位相比較器には低雑音特性かつ高周波での使用が可能なことから、パッシブミキサ（リング変調器）が用いられていたが、信号パワー依存性や温度依存性などが測定精度に影響を及ぼす。そこで、パッシブミキサを使用せずに位相雑音を測定する手法として、被測定信号を直接 AD 変換器でサンプリングし、計算機による数値演算のみで位相雑音を算出する全デジタル型位相雑音測定装置を開発した^[3]。さらに、被測定発振器よりも位相雑音特性の悪い基準発振器を用いた場合であっても、デジタル信号処理により、DUT の位相雑音のみを測定可能となった^[4]。詳細は発表時に示す。

4. 水晶振動子を用いた微小質量センサの開発

水晶発振器の周波数が高安定なことは前述したが、機械的振動であるため、振動部に直接物理的影響を与えればその安定した振動が乱されることとなる。これを利用したデバイスの一つとして、水晶振動子微量秤（QCM: Quartz Crystal Microbalance）が挙げられる。QCM は、その電極表面に物質が付着し、質量が増加すると共振周波数が質量に応じて低下する。一般的な 9MHz の振動子の場合、1ng（ナノグラム）の質量増で約 1Hz の周波数低下が起こることが知られており、生体の抗原・抗体反応計測等に利用されている。従来

QCM の性能向上は主として振動子表面に目的とする物質のみを選択的に吸着する化学的な反応膜の改良により行われてきたが、著者はこれに対して回路側の工夫で測定感度の向上と測定速度の向上を実現した。これは、1 枚の水晶板上に 2 組の水晶振動子を作製し、一方の振動子には反応膜を塗布し物質を付着させる質量検出用、もう一方は無加工の基準周波数用とし、差分を計測することで温度変化等の外乱の影響をキャンセルするものである。通常は差周波を測定すればよいが、周波数カウンタによる測定ではゲート時間によって測定時間が制限されるため、周波数ではなく両信号の瞬時位相差から質量に換算する位相同期型 QCM を開発し、数 pg（ピコグラム）に相当する疑似質量変化を数 mV（ミリボルト）の変化として検出可能であることを実証した^[5]。詳細は発表時に示す。

5. おわりに

今後数年以内には、年間 1 兆個以上のセンサを使用するトリリオンセンサ時代が訪れるとされており、ありとあらゆるセンサが身の回りに存在し、通信ネットワークを形成することが予想される。低コスト、高安定、センサへの応用が容易という特徴を持つ水晶振動子はその利用範囲の更なる拡大が期待される。

謝辞

本研究成果の一部は JSPS 科研費 23760373, 25820175, JP18K04181, (財) 双葉電子記念財団の助成を受けた。

参考文献

- [1] 今池, 作田, 関根: 「インピーダンス整合を重視した発振回路の位相雑音特性」, 電学論 C, Vol.129, No.4, pp.608-613, 2009
- [2] 今池, 作田, 関根: 「外部水晶共振回路を用いた発振器の位相雑音低減手法」, 電学論 C, Vol.131, No.3, pp.507-513, 2011
- [3] 今池, 作田: 「アンダーサンプリングを用いたフルデジタル位相雑音計測におけるノイズフロアの推定とその特性」, 電学論 A, Vol.137, No.1, pp.71-77, 2017
- [4] 今池, 佐々木: 「2 つの基準発振器を用いたフルデジタル位相雑音計測」, 電学論 A, Vol.138, No.5, pp.192-197, 2017
- [5] S. Yamada, Y. Kaneko, T. Imaiike, and Y. Sakuta, "A New Technique for Improving Sensitivity of Quartz Crystal Microbalance based on Phase Locked Loop", Proc. of AVIC, pp. 112-116, 2013