

今どきの高周波測定技術と 測定器管理の基礎知識

～ その2 周波数測定器における確度評価の実際 ～

現在の無線通信はデジタル変調方式が大勢を占めている。しかし、信号の振幅、位相、周波数を変化させて情報を伝えるという方法は根本的にアナログ変調方式、デジタル変調方式の何れであっても変わることはない。高周波信号の場合、周波数、振幅、減衰量、インピーダンスなどを測定し、その変化を捉えることが実際に無線通信を行うためには必要不可欠になる。このとき高周波信号の測定では、直流・低周波信号の場合とは異なる注意が必要となっている。今回より、これらの測定方法について一つずつ概説していきたい。

アンリツカスタマーサポート株式会社
山崎 俊雄



周波数遠隔校正装置と筆者

はじめに

今日、私たちはデジタル通信技術の恩恵を受けて日々暮らしている。地上デジタルテレビ放送でニュースを視聴し、通勤の合間には情報通信端末でメールを受け取ったりしている。しかし、実際にこれらの情報通信を成立させるためには、通信装置の送信側と受信側で通信周波数を十分に合わせる必要がある。両者の周波数が合っていなければ通信を実現することはできないので、放送局や携帯電話基地局が出す信号波の周波数、あるいはテレビや情報通信端末の同調周波数などは、あらかじめ十分評価され確定される必要がある。この評価に利用される測定器は周波数カウンタやスペクトラムアナライザであるが、何れの測定器にも基準発振器が内蔵されている。

今回は、すべての周波数測定のもととなる基準発振器の周波数の確度評価について考察したい。まず、SI単位に由来する周波数の定義について簡単に触れる。次に、異なる発振器同志の周波数の比較方法を説明する。最後に、遠隔地にある発振器同志の周波数の比較方法を紹介する。

周波数の高確度化の要求

一般に、通信の高速化、大容量化が進行するほど周波数の高密度利用が要求される。典型的な例が地上デジタルテレビ放送であり、電波法の規定によれば、その送信設備に使用する電波の周波数の許容偏差は1Hz

[1]と定められている。地上デジタルテレビ放送は470MHz～770MHzの範囲であるから、相対周波数許容偏差は $2.1 \times 10^{-9} \sim 1.3 \times 10^{-9}$ になる。送信設備の基準発振器はそれより1桁以上よい周波数確度が必要なので 1.3×10^{-10} より良いものが用いられ、さらに送信設備の点検を行うための測定器は 1.3×10^{-11} 以上の周波数確度を持つ基準発振器を用いなければならない。ここまで高確度要求が進むと、通常の水素発振器ではその要求性能を満たすことができず、ルビジウム原子発振器などを用いるが必要になる。このような背景から今日では産業界においても原子発振器の普及が進んでいる。

周波数の基準とは

これほどの周波数確度を実現するためには、相当高確度の周波数の基準が必要になるであろうことは想像に難くない。では、その基準とはどのようなものだろうか。

周波数はSI（国際単位系）の時間の単位である秒の逆数として求められる。1秒という時間は「セシウム133の原子の基底状態の2つの超微細順位の間の遷移に対応する放射の周期の9,192,631,770倍の継続時間」と定義されているので、定義に従った周波数の高周波信号を忠実に再現することで正確な周波数の基準を得ることができる。その高周波信号はセシウム原子発振器によって実現される。その構造を図1に示す[2]。

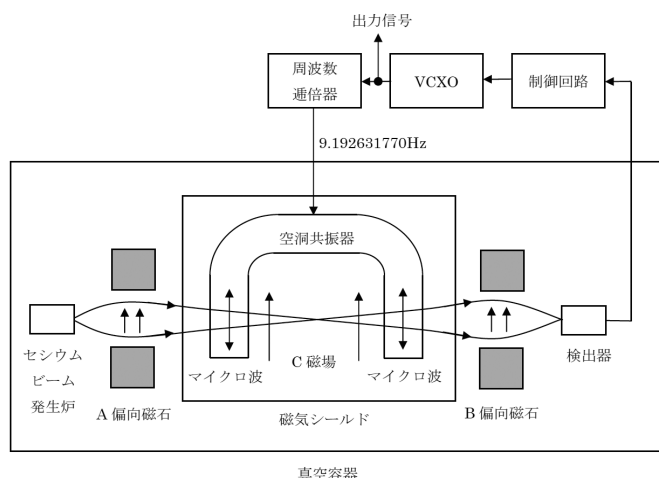


図1 セシウム原子発振器の構造

まず、セシウム原子発生炉を約 80℃ に加熱すると細いスリットを通してセシウム原子がビーム状に噴出する。このときエネルギー順位が $F=3, m_F=0$ (F, m_F はエネルギー順位を表す記号) の原子と $F=4, m_F=0$ の原子が放出され、それらが A 偏向磁石による磁場を通過するとき、それぞれが逆方向の力を受ける。中央にある 2 つの空洞共振器には 9.192631770Hz のマイクロ波が入射されており、セシウム原子はマイクロ波と共鳴して $F=3, m_F=0$ の原子が $F=4, m_F=0$ に、 $F=4, m_F=0$ の原子が $F=3, m_F=0$ に遷移する。B 偏向磁石は A 偏向磁石と同じ磁場を与え、そこを通過するセシウム原子は A 偏向磁石と同様にそれぞれが逆方向の力を受けて検出器に到達する。セシウム原子の共鳴はマイクロ波の周波数が正確に 9.192631770Hz のときに起きるので、検出器の出力が最大になるよう VCXO の発振周波数を制御する。

実際には、原子の基底状態からの遷移を確実に行うための様々な問題があり、それらを解決するための技術改良が行われ今日に至っている。日本標準時を維持管理する NICT (情報通信研究機構) が保有するセシウム原子発振器の周波数確度はおよそ 1×10^{-15} である [3]。

市販の原子発振器

一方、産業界ではより安価で実用的な原子発振器を利用しており、一例として以下のようなものが市販されている。

- ①市販型のセシウム原子発振器 (据え置き型)
- ②ルビジウム原子発振器 (小型で運搬も可能)

③チップスケール原子発振器 (モジュールサイズ)

これらの原子発振器は、その用途により周波数確度や周波数安定度の仕様が異なる。しかし、何れも 1×10^{-11} 以上の周波数確度が得られるものが多い。これらの周波数を基準となる周波数と比較するときには注意すべき事項は以下のようなものがある。

- a) 使用用途に応じた動作状態を再現すること
- b) 測定時間と周波数安定度の最適値を考慮すること
- c) 測定方法はできるだけ単純なものとし、測定確度の見積もりを容易に可能とすること

周波数の測定方法

さて、基準となる周波数が得られ、市販の原子発振器も入手可能な状態で、次なる課題は実際に周波数を比較して正しく周波数を移植する方法を確立することである。

まず、もっとも単純な周波数測定方法の原理を図 2 示す。測定対象となる信号 (正弦波) を波形整形回路で矩形波に変換し、周波数に同期したトリガパルス列を発生させる。そのトリガパルスに対して単位時間 (例えば基準発振器から作られる正確な 1 秒) だけオンとなるゲートパルスをかけて、その間の通過パルス数を数えれば周波数が求められる。このような方法は「直接計数方式」と呼ばれている。

直接計数方式は原理が単純であるものの、周波数分解能を上げることが必要な場合には T_s を相当長くしなければならないという問題がある。仮に 10MHz の信号に対して相対確度で 1×10^{-12} を得ようとした場合、0.01mHz までが有効桁となるので、 T_s は 100,000 秒 (=27.8 時間) となる。

実際に、周波数測定上の諸問題を解決する手法としてレシプロカル法 [4] などが考案されている。しかし、

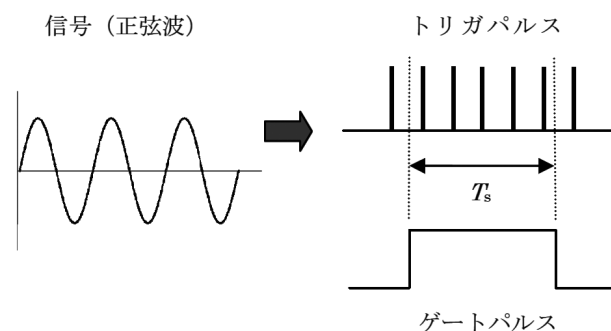


図2 周波数測定の原理

原子発振器では周波数の絶対確度だけでなく周波数安定度も評価する必要がある場合が少なくない。図2の方法ではどうしても測定間隔が長く、また測定結果が離散的になる欠点がある。

周波数較正の実際

では、どうすればより正しく（細かく）周波数を比較（較正）することができるのか。その方法として注目されるのは、信号の単位時間の位相安定度に着目して、その変化の有無から基準信号との周波数差を求めようとするものである。その代表的な手法に「時間間隔測定法」[5]と呼ばれる測定方法がある。

時間間隔測定法のブロック図を図3に、測定原理を図4に示す。基準信号 (f_s) と被較正信号 (f_d) は、ともに波形整形回路で矩形波に整形されたのち、両者の信号がタイムインターバルカウンタに導入される。 f_s と f_d の立下り時間の間隔 (Δt_n) を連続して記録する。 f_s と f_d の周波数が全く同じであれば Δt_n はいつまでもたっても変化はないが、実際には僅かな周波数差があるために Δt_n は次第に変化することになる。例えば1時間で360度（1周期）の位相差が生じたとすれば、基準信号と被較正信号の周波数差は $1/3600$ (sec) = 2.8×10^{-4} (Hz) と求めることができる。

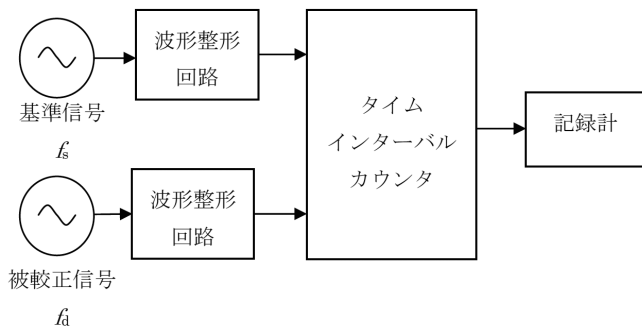


図3 時間間隔測定法のブロック図

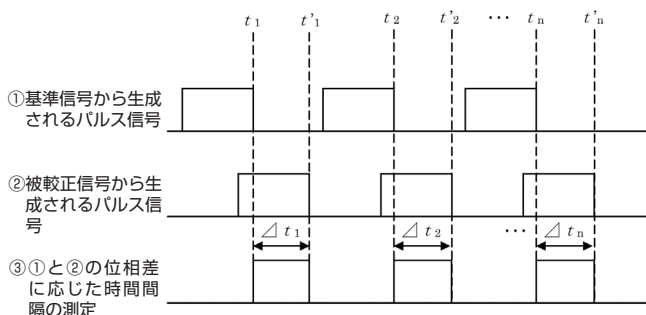


図4 時間間隔法の測定原理

直交検波器を用いた位相差検出法

一方、近年のデジタル通信技術の発達により、信号の位相差をデジタル的な情報として取り出すことも可能となってきた。その実現手段が直交検波器を用いた位相差検出の方法である。図5に直交検波法による位相比較器の例[6]を示す。デジタル信号処理技術の

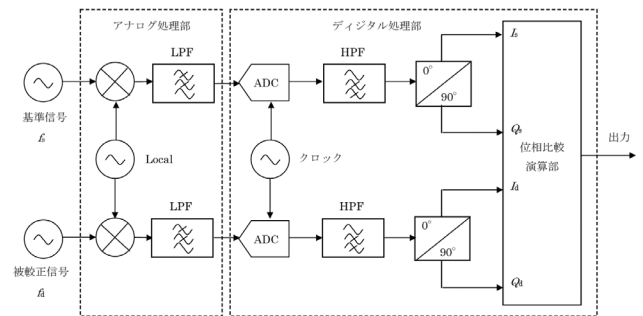


図5 直交検波法による位相比較器のブロック図

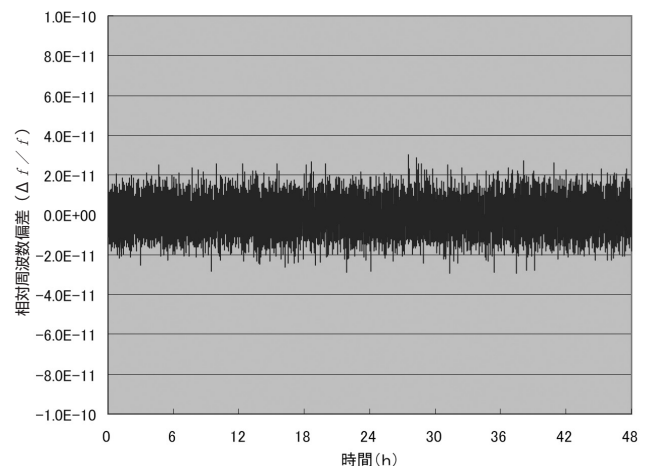


図6 位相比較器による周波数較正の例 (周波数: 10MHz)

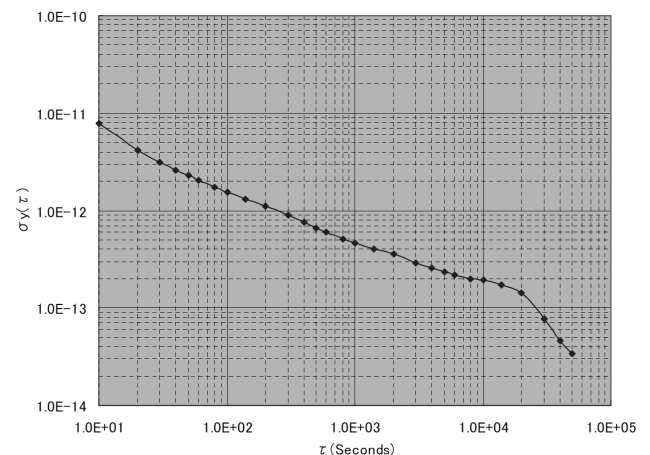


図7 周波数安定度の測定例 (周波数: 10MHz)

進歩から、現在では時間間隔測定法の確度を上回る性能をもつものが登場しており、今後も発展が期待される技術として注目を集めている。

図5による周波数比較測定のを図6に示す。図6は当社の周波数基準（セシウム原子発振器）と現場の実用標準（ルビジウム原子発振器）の周波数を比較したものである（測定時間は48時間）。周波数の安定度は一般的にアラン標準偏差（ $\sigma_y(\tau)$ ）[7]という指標を用いて表す。図7は図6における $\sigma_y(\tau)$ の測定結果である。この場合は 1×10^{-13} 程度であったことが分かる。

周波数の遠隔較正

図3や図5のような周波数の較正は、周波数の基準が設置されている場所に被較正発振器を移動させなければならないという問題がある。しかし、設置型の原子発振器には容易に運搬できないものも少なくない。このような問題に対し、GPSとインターネットを利用した周波数の遠隔較正技術が開発されている。

図8に周波数遠隔較正技術の概要を、図9に異なる2地点の周波数比較の原理を示す。まずA地点、B地

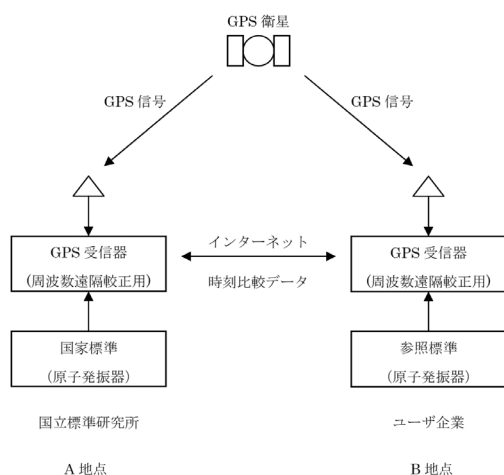


図8 周波数遠隔較正技術の概要

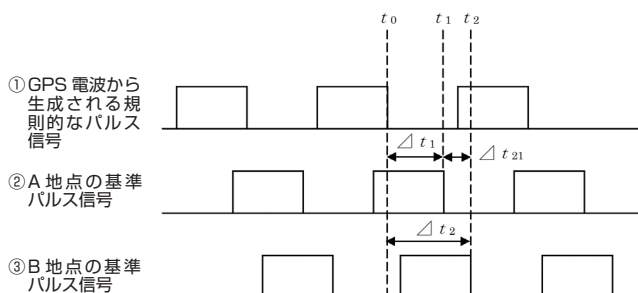


図9 異なる2地点の周波数比較の原理

点ともに同じGPS信号から生成されるクロック信号を再生する。このとき、両者ともにこのクロック信号の立ち下がり（ t_0 ）として記録する。A地点では基準発振器から生成されるクロック信号の立ち下がり（ t_1 ）として記録する。ここで t_1 と t_0 との時刻差を計算し Δt_1 を求める。次にB地点でも基準発振器から生成されるクロック信号の立ち下がり（ t_2 ）として記録する。ここで t_2 と t_0 との時刻差を計算し Δt_2 を求める。さらに、インターネットを仲介して Δt_1 と Δt_2 を相互に交換する。こうして得られた Δt_1 と Δt_2 の差分を Δt_{21} とする。この Δt_{21} は図4の Δt_1 と等価であり、 Δt_{21} の変化を決められた測定時間に渡って蓄積することで両者の周波数差を求めることができる。

この方法はコモンビュー法（共通視界法）と呼ばれ、これまでは主に各国の国家標準同志の周波数を比較することに用いられてきた。この技術は、現在では民間にも開放されており、今では国家標準との周波数比較がほぼリアルタイムで可能になっている。

まとめ

最近では基準発振器に市販のGPS従属同期式発振器を使用するケースも多く見られている。「GPS信号波は周波数が正確なので較正は不要」とする見方もあるが、「（確度が明らかである）国家標準へのトレーサビリティが未確保である」という点で問題が残る。国家標準にトレーサブルな較正を受けた市販型原子発振器が活躍する場面は依然として多いと言えよう。

周波数はあらゆる物理量の中で、最も高精度にその基準値が確定されている。最新の研究によれば、次世代の周波数基準として期待されている光格子時計の周波数確度は 1×10^{-18} の領域にまで到達している[8]。しかし、そこで用いられる周波数比較技術の基本は何ら変わることはない。超高精度な基準発振器を自在に使いこなす未来の情報通信技術がどのようなものになるのか、今からとても楽しみである。

参考文献

- [1] 電波法無線設備規則第5条別表1
- [2] 大津元一：「レーザと原子時計」、1986年、pp.113～pp.120、オーム社
- [3] NICT NEWS No.451、2015年4月、pp.2～pp.5
- [4] 大森俊一、横島一郎、中根央：「高周波・マイクロ波測定」1992年、pp.174～pp.175、コロナ社
- [5] 今江理人ほか：「周波数標準の校正法とその不確かさ」、産総研計量標準報告 Vol. 5, No. 4、pp.291～pp.301、2007年1月
- [6] 内野政治、望月健：「デジタル信号処理を使った周波数安定度測定法」、信学論(B)、Vol.J85-B No.7 pp.1031-1041、2002年7月
- [7] 森川容雄：「時間・周波数標準の基本的尺度」、通信総合研究所季報 Vol.49、pp.9～pp.14、2003年
- [8] NICT NEWS No.451、2015年4月、pp.10～pp.11