GPSを利用した精密周波数源の周波数変動に対する検討

非会員 塩 田 智 基 (日本大学)

正 員 万 寿 邦 彦 (日本大学)

非会員 鶯 塚 日出夫 (キンセキ株式会社)

正 員 関 根 好 文 (日本大学)

A study on Frequency Stability of High Precision Oscillator using GPS

Tomoki Shioda, Non-member (Nihon University), Kunihiko Manju, Member (Nihon University),

Hideo Otsuka, Non-member (Kinseki Ltd.), Yoshifumi Sekine, Member (Nihon University)

This paper studies on high precision oscillator using GPS. In recent years, the high stabilization of the oscillator has been requested along with high speed of mobile communication devices.

In this paper, first, we study on the relation between the number of measurement times and precision of the GPS reception signal. Because SA(Selective Availability) was canceled from May 2000, the precision of the received GPS signals is improving at present. Therefore, there is a possibility that we can decrease the integration number of measurement times. We show that integration with approximately 10^3 times must be done. As a result we show that equal or superior stability is obtained at 1/10 the previous integration number of time.

Also, the GPS reception signal has the high stability for the aging characteristic. We study on improvement of aging characteristic of crystal oscillator by using estimate function. As a result, we show that the frequency change reducing method by the aging characteristic revision is effective.

キーワード : 精密周波数発生源, 水晶発振器, エージング, GPS

keywords : High Precision Frequency Source, Crystal Oscillator, Aging, GPS

1 ま え が き

近年移動体通信機器の高速化に伴い、周波数発振源の高安定化が求められている。精密周波数源である原子発振器は、温度や電源などの変動による周波数変動を軽減させるため、比較的、システムが複雑になる傾向があり、一般に、高価である。そのため、精密周波数をより手軽に得る方法が求められている。最近ではGPS(Global Positioning System)の信号を利用することで、原子発振器レベルの出力精度を得る方法が期待されている^[1]。さらに、2000年5月よりSA(Selective Availability)^[2]が緩和され、GPS受信信号の精度が向上したため、さらなるシステム改善が期待できる。我々は先にGPSを利用した発振源として制御ループを構築し、精密発振源について報告した^[3]。本システムではGPSから受信される1[pps]時刻同期信号の短期安定度をGPS本来の原子発振器レベルの精度に近づけるため積分を行っている。1[pps]時刻同期信号はSAが緩和した現在でも劣化している。

今回、SAの緩和により、積分回数を減少可能と考え、SA緩和後のGPS受信信号を測定し、積分回数との関係を示す。

次に、システム内の水晶発振器のエージング特性を、過去のデータをもとにした予測関数を用いて周波数の変動を予測し、補正を行う方法について示す。さらに、実際の測定データを用い、その予測関数の有効性について確認する。

2. GPSを利用した精密周波数源

GPSは、連続的に測位可能な衛星航法システムで、位置情報の他に世界協定時(UTC)に同期した1[pps]時刻同期信号を得ることができる。この1[pps]時刻同期信号は、基準発振源としてはGPSの衛星内のセシウム、又はルビジウム原子発振器が用いられており、長期安定度が優れている。本来は短期安定度も優れているが、SAにより意図的にノイズを付加されているため、短期安定度は十分でない。そこで、短期安定度の優れた水晶発振器と組み合わせることにより精密周波数発生システムを構成している。GPSを利用した精密周波数発生システムの回路構成については幾つか報告がなされている^{[1][2]}。

図1に、我々が考案した精密周波数発生システムの構成図を示す。まず、GPS Receiverから出力される1[pps]時刻同期信号を基準信号としてCounterのGateに人力し、VC-OCXO(Voltage Controlled - Oven Controlled Crystal Oscillator)^[4]の周波数を測定しComputerへ出力する。次に、Computerが補正值を算出し、そのデジタル出力をD/Aコンバータ(DAC)を介してVC-OCXO制御電圧 V_c としてVC-OCXOに帰還することで周波数変動を補正する構成となっている。

図1 GPSを用いた精密周波数源
Fig.1 High Precision Frequency Oscillator using GPS

図2に、GPS Receiverから取得できる1[pps]時刻同期信号の周波数特性の模式図を示す。同図は1[pps]時刻同期信号は長期では安定していることを示しているが、短期で見るとSAにより意図的にノイズが付加されたため変動していることを示している。GPSは内部基準として原子発振器を使用しているため、この短期的変動分を除去することにより原子発振器レベルの精度を得ることが可能と考え、本システムでは、この短期的変動分を除去する方法として積分を用いた。

図2 1[pps]時刻同期信号の周波数特性模式図
Fig.2 Frequency Characteristic Image of 1[pps] Time Synchronous Signal

次に、図3に水晶発振器の周波数特性の模式図を示す。同図は、短期で見ると安定しているが、長期で見ると水晶振動子のエージング特性などにより周波数が変動することを示している。図1のシステムでは、この長期的変動分を長期で安定している1[pps]時刻同期信号により補正し、補正値をComputerに蓄積している。その蓄積したデータを用いてエージング特性の予測関数を作成し、水晶振動子のエージングなどによる長期的変動分を補正している。このような構成により、水晶発振器の短期安定度の良さと、GPSの長期安定度の良さを合わせ持つ精密周波数の発生が期待できる。

図3 水晶振動子の周波数特性模式図
Fig.3 Frequency Characteristic Image of Crystal

3. 積分によるGPS時刻同期信号の周波数変動軽減

GPSの1[pps]時刻同期信号は、SAによりノイズが付加されていた。2000年5月2日13:00よりSAが緩和したため、現在では、2000年5月以前に比べ精度が向上している。しかし、現在でも1[pps]時刻同期信号は変動している。1[pps]時刻同期信号は、世界協定時に対して同期が取られているため、1[pps]時刻同期信号の周波数変動による影響は、その周波数変動分を積分することにより、精度をさらに向上させることができる。

図1において、CounterはVC-OCXOの周波数 f_{out} を、1[pps]時刻同期信号の精度で測定するため、Counterの出力結果は f_{out} 付近で変動した値となる。そこで、1秒毎に出力されるCounterの出力結果を、Computerで一定時間積分することで、1[pps]時刻同期信号の周波数変動分を軽減できる。この方法によって、高い精度で f_{out} を測定することができる。

1[pps]時刻同期信号は、SAが緩和した現在でも予測不可能で不規則な変動をしている。その不規則な周波数変動成分をホワイトノイズとみなし、検討を行った。

図4に、シミュレーションに用いた乱数系列を示す。同図は、周波数変動範囲を±1のホワイトノイズである。

図4 乱数系列
Fig.4 Random Series

図5に、図4のデータを、 10^4 回までの積分を行った周波数変化率特性を示す。同図は、積分回数の増加に伴い周波数変化の範囲が 10^{-2} 以下に減少していることを示している。これにより、積分が周波数変動の軽減に有効であることを確認した。

図5 シミュレーション結果
Fig.5 Simulation Result

次に、実測データを用いて周波数変動軽減効果について検討を行った。

図6に、SA緩和後の1[pps]時刻同期信号を測定した周波数変化率を示す。同図は、1[pps]時刻同期信号の精度が ± 0.01 [ppm]であることを示している。GPS受信機にはGT-74NNNCを使用し、Time Interval Analyzer(HP5371A)の基準にはルビジウム原子発振器を使用した。

図6 1[pps]時刻同期信号
Fig.6 1[pps] Time Synchronous Signal

図7に、図6のデータを積分した結果を示す。図8に、積分回数950回から1150回までの拡大図を示す。同図は、システムの周波数安定度を、仮にセシウムもしくはルビジウム原子発振器並みの 10^{-11} の精度と設定した場合、 10^{-11} の精度を実現するためにはおよそ 10^3 回以上の積分回数が必要であることを示している。これは図1のシステムにおいてCounterの出力結果をComputerによって 10^3 [s]以上積分を行うことによって f_{out} を 10^{-11} より高い精度で出力できることを示している。

2000年5月以前に同様の検討を行った結果、目標精度 10^{-11} を実現するためには、およそ 10^4 回の積分を行う必要があることを示した¹³⁾。それに対し今回は、およそ 10^3 回の積分回数で目標精度 10^{-11} を実現できることを示した。つまり、1/10の積分回数で今までと同等の安定度を得られることを確認した。

図7 積分結果
Fig.7 Integral Result

図8 積分結果 (拡大図)
Fig.8 Integral Result (Magnification)

4. エージング特性補正による周波数変動軽減

4-1. 原理

次に、水晶発振器のエージング特性による周波数変動を予測し、予測関数を作成することによってリアルタイムに補正を行う方法について検討した。

図9に水晶振動子の一般的なエージング特性として考えられている3種類の特性(①、②、③)の概略図を示す。同図の特性はExponential関数で表すことができ、一般式¹⁴⁾は次式のように示される。

$$\Delta f / f_0 = \underbrace{A_1(\exp(-a_1 \times t) - 1)}_{\text{第1項}} + \underbrace{A_2(1 - \exp(-a_2 \times t))}_{\text{第2項}} \quad \cdots(1)$$

図9 一般的な水晶のエージング特性
Fig.9 Aging Characteristic of General Crystal

式(1)において、第1項は動作以後に汚染が発生する過程を示しており、時間とともに周波数が減少する項で、この項が支配的な場合、図9における③の特性となる。第2項は動作以前の歪、汚染などが解消する過程を示し、時間とともに周波数が増加する項で、この項が支配的な場合、図9における①の特性となる。また、第1項と第2項の合成の例が②の特性に相当する。これらの特性をもとに、式(1)を予測関数とした。

図1のシステムでは、第3章でも述べたように1[pps]時刻同期信号によってVC-OCXOの周波数変動を補正している。その補正值をComputerに蓄積しており、この補正データから振動子のエージング特性に近いデータが取得できる。取得したエージングデータを利用することによって、Computerにより予測関数を作成し、補正信号の出力をすることによってシステムへ適用する。

本手法では、数式的な解析が困難であるので、エージングデータへ最小二乗法を適用し予測関数を決定している。今回の検討ではエージングデータに予測関数のフィッティングを繰り返す方法をとった。フィッティングは残差二乗和 ψ が収束するまで行い、予測関数の各係数 A_1, a_1, A_2, a_2 を決定した。

t_1 時刻から t_n 時刻までのエージングデータを $f_1 \sim f_n$ としたときの残差二乗和 ψ は、式(1)を用いると次式で示せる。

$$\psi = \sum_{i=1}^n \left\{ \underbrace{f_i - \left[A_1 (\exp(-a_1 \times t_i) - 1) \right]}_{\text{第1項}} + \underbrace{A_2 (1 - \exp(-a_2 \times t_i))}_{\text{第2項}} \right\}^2 \quad \cdots(2)$$

ただし、 $a_1 > 0, A_1 > 0, a_2 > 0, A_2 > 0$ とした。

ここで、 ψ が最小点をとる f_i の条件を、式(2)の第1項、第2項それぞれについて検討した。

4-2. 第1項に対する検討

式(2)の第2項が無視できる場合、 ψ は次式で示せる。

$$\psi = \sum_{i=1}^n \left(f_i - A_1 (\exp(-a_1 \times t_i) - 1) \right)^2 \quad \cdots(3)$$

ここで、

$$y_{1i} = f_i - A_1 (\exp(-a_1 \times t_i) - 1) \quad \cdots(4)$$

とおくと、式(3)は次式で示せる。

$$\psi = \sum_{i=1}^n (y_{1i})^2 \quad \cdots(5)$$

図10は、 $A_1 > |f_i|$ のときの y_{1i} の軌跡を示している。図中、実線は $f_i \geq 0$ の場合、破線は $f_i < 0$ の場合である。

図10 y_{1i} の軌跡
Fig.10 Locus of y_{1i}

図11 y_{1i}^2 の軌跡
Fig.11 Locus of y_{1i}^2

図11に、 $f_i \geq 0$ (実線)、 $f_i < 0$ (破線)の条件における、 y_{1i}^2 の軌跡を示す。同図は、 y_{1i}^2 は $A_1 > |f_i|, f_i < 0$ の条件で、最小点を有することを示している。

つまり、第1項は式(5)で表されることより、 $A_1 > |f_i|, f_i < 0$ の条件の場合、 ψ の最小値が決定できる。

4-3. 第2項に対する検討

次に、第2項についても第1項と同様に考える。
式(2)の第1項が無視できる場合、 ψ は次式で示せる。

$$\psi = \sum_{i=1}^n \left(f_i - A_2 (1 - \exp(-a_2 \times t_i)) \right)^2 \quad \cdots(6)$$

ここで、

$$y_{2i} = f_i - A_2 (1 - \exp(-a_2 \times t_i)) \quad \cdots(7)$$

とおくと、式(3)は次式で示せる。

$$\psi = \sum_{i=1}^n (y_{2i})^2 \quad \cdots(8)$$

図12は、 $A_2 > |f_i|$ のときの y_{2i} の軌跡を示している。図中、実線は $f_i \geq 0$ の場合、破線は $f_i < 0$ の場合である。

図12 y_{2t} の軌跡
Fig.12 Locus of y_{2t}

図13 y_{2t}^2 の軌跡
Fig.13 Locus of y_{2t}^2

図13に、 $f_i \geq 0$ (実線)、 $f_i < 0$ (破線)の条件における、 y_{2t}^2 の軌跡を示す。同図は、 y_{2t}^2 は $A_2 > |f_i|$ 、 $f_i \geq 0$ の条件で、最小点を有することを示している。

つまり、第2項は式(8)で表されることより、 $A_2 > |f_i|$ 、 $f_i \geq 0$ の条件の場合、 ψ の最小値が決定できる。

以上、表1に最小点の関係を示す。 $A_2 > |f_i|$ の条件で予測関数が最小点を有することを示し、収束可能であることを明らかにした。

表1 最小点

Table.1 Minimum Point

f_i	$f_i < 0$	$f_i \geq 0$
最小点	第1項	第2項

4-4. 結 果

本手法の有効性について実測データを用いたシミュレーションを行った。一般的なエージング特性は図9に示したように3種類のパターンを有していると考えられている。そこで、今回それぞれのパターンに対応する実測データについて検証を行った。

図14～16に、検証に使用したエージング特性の実測データ(図中before)を示す¹⁵⁾。

図14 ①のエージング特性例
Fig.14 Example of Aging Characteristic about ①

図15 ③のエージング特性例
Fig.15 Example of Aging Characteristic about ③

図16 ②のエージング特性例
Fig.16 Example of Aging Characteristic about ②

図14～16に、エージング特性補正後の結果(図中after)を示す。図14は、補正前では周波数変化率が0.25[ppm]であるが、補正後は0.13[ppm]となり、周波数変化が減少できることを示している。図15は、補正前では周波数変化率が4.30[ppm]であるが、補正後は1.00[ppm]となり、周波数変化が減少できることを示している。図16は、補正前では周波数変化率が2.30[ppm]であるが、補正後は0.50[ppm]となり、周波数変化が減少できることを示している。

以上、一般的な3種類のエージング特性に対して、それぞれ周波数変動を改善できることを示し、今回検討したエージング特性補正による周波数変動軽減法の有効性を示した。

さらに、本手法は、GPSの受信が一時的に途絶えた場合や、起動直後など、GPSから受信時間が十分でない場合でも、水晶発振器のエージング特性を予測することが可能なため、常に精密な周波数を得ることができ、有効な手法といえる。

5. む す び

今回、SAの緩和により、積分回数を変更できる可能性があると考え、SA緩和後のGPS受信信号の精度を測定し、積分回数について検討を行った。その結果、目標精度 10^{-11} を実現するためにはおよそ 10^3 回の積分回数が必要であることを示した。つまり1/10の積分回数で今までと同等の安定度を得られることを確認した。

さらに、システム内の水晶発振器のエージングを予測関数の導出によって補正する方法について検討し、実際のエージングデータを用い、その予測関数の有効性について確認を行った。その結果、一般的な3種類のエージング特性に対して、周波数変化を減少できることを示し、今回検討したエージング特性補正による周波数変動軽減法の有効性を示した。

今後は、エージング特性補正による周波数変動軽減法において、予測関数を周波数データにフィッティングを行う際、収束値の妥協点、決定方法について検討し、実際のシステムに組み込む際に要求される補正間隔について検討していく予定である。

(平成13年7月16日受付、同14年1月4日再受付)

文 献

- [1] 氏家仁：“GPSを利用した精密周波数発生器”，電気学会計測研資，IM-97-42，pp.21-26，(1997)
- [2] 今江理人，細川端彦，花土ゆう子，今村国康，大塚敦：“長波標準周波数局の整備とその応用”，電気学会電子回路研資，ECT-97-88，pp.13-17，(1997)
- [3] 小松原円，関根好文：“GPSを利用した精密周波数源の温度特性に対する一検討”，1998年信学ソ大，A-1-8，(1998)
- [4] 岡野庄太郎：“水晶周波数制御デバイス”，テクノ，pp.97-139，(1995)
- [5] 岡野庄太郎，高沢幸次：“特集・半導体時代の水晶発振器” 電子展望，誠文堂新光社
- [6] 例えば“Interagency GPS Executive Board”
URL <http://www.igeb.gov/sa/>

塩 田 智 基

(非会員) 平13日大・理工・電子卒，現在，同大大学院博士前期課程在学中，水晶発振器，精密周波数源に関する研究に従事，電子情報通信学会会員。

万 寿 邦 彦

(正員) 昭50日大・生産工・電気卒，同年同大勤務，現在，日大専任講師，生産工・電気電子勤務，主にトランジスタ水晶発振器，CAI，衛星を用いた応用計測などの研究に従事，電子情報通信学会，日本シミュレーション学会各会員。

鶯 塚 日出夫

(非会員) 昭49日大・理工・電気卒，昭51同大大学院修士課程修了，同年キンセキ(株)入社，現在，同社産業機器センター所属，水晶発振器及び水晶振動子の研究開発に従事。

関 根 好 文

(正員) 昭41日大・理工・電気卒，昭43同大大学院修士課程修了，同年日大助手，現在，同大電子情報工学科教授，工博，主に負性抵抗素子，発振回路，ハードウェアニューロンモデル，及び，その応用に関する研究に従事，著書「電子計測」，「エレクトロニクス計測」，「デジタル回路」，IEEE，電気学会，日本神経回路学会，時計学会各会員。